

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

KATEDRA TVÁŘENÍ MATERIÁLU

Analýza toku kovu při válcování tlustých vývalků

Metal flow analysis during rolling of thick blooms

Student: Milan Migdal

Vedoucí diplomové práce: Ing. Richard Fabík, Ph.D.

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra tváření materiálů

Zadání bakalářské práce

Student: **Milan Migdal**
Studijní program: B2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109R034 Technologie tváření a úpravy materiálů
Téma: Analýza toku kovu při válcování tlustých vývalků
Metal flow analysis during rolling of thick blooms

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teorie válcování (tlusté vývalky)
3. Návrh experimentu a cíle práce
4. Popis experimentu
5. Analýza výsledků
6. Diskuse a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ŽÍDEK, M., KUŘE, F. *Válcování*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1983, 1. vydání.
[2] GINZBURG, V. B. *Steel-rolling technology : theory and practice*. New York : Marcel Dekker, 1989.
ISBN 0-8247-8124-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Richard Fabík, Ph.D.**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jaromír Horsinka

Datum zadání: 30.11.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010

prof. Ing. Jiří Kliber, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list + zásady pro vypracování BP | 5. Textová část BP |
| 2. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 6. Seznam použité literatury |
| 3. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 7. Přílohy |
| 4. Obsah BP | |

ad 1) Titulním listem je originál zadání BP, který student obdrží na své oborové katedře. Za titulním listem následují tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“.

ad 2) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě a vlastnoručně podepsáno studentem s uvedením data odevzdání BP. *V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.*

ad 3) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany.

ad 4) Obsah BP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 5)

Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3,5 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 7).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich

vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 6) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 7) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*


dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON včetně abstraktu a klíčových slov v češtině a angličtině.

IV.

Bakalářská práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2009/2010.

Ostrava 30. 11. 2009


Prof. Ing. Eudovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě

.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Abstrakt

Tato práce se zabývá analýzou toku kovu při válcování za tepla. Laboratorně byl zkoumán vliv původní a nové kalibrace na průnik plastické deformace a intenzitu zavaření předem vyvrtaných dutin u oceli 42CrMo4. Pomocí optického mikroskopu byla porovnána míra uzavření dutin mezi jednotlivými kalibracemi. Jsou zde shrnuty možné nedostatky při výrobě bloku z plynule litého polotovaru (PLP), jako jsou vysoká lící rychlost, nerovnoměrné chlazení, dlouhá výdrž na teplotě, nízká dotvářecí teplota aj. Výsledky experimentu ukázaly, že míra uzavření póru byla ovlivněna parametry válcování a to především velikostí poměrné deformace, polohou otvorů vzhledem k válcovací ploše a změny kalibrace.

Klíčová slova: válcování za tepla; ocel 42CrMo4; mikrostruktury, průnik plastické deformace

Abstract

This work deals with hot rolled metal flow analysis. Influence of the primary and new calibration on penetration of plastic deformation and intensity of welding-up of pre-drilled cavities in 42CrMo4 steel was laboratory-tested. Extent of enclosure of cavities was compared between particular calibrations with the help of an optical microscope. There are some possible deficiencies occurring when rolling a block from a semi-finished billet outlined, such as high casting speed, uneven cooling, long temperature-holding time, low finishing temperature etc.,. The results of the experiment show that the extent of enclosure of cavities was influenced by rolling parameters, first of all by relative deformation rate, position of bores in reference to the rolled surface and calibration changes.

Key words: hot rolling; steel 42CrMo4; microstructure, penetration of plastic deformation

OBSAH

1. ÚVOD.....	1
2. PLYNULÉ LITÍ.....	2
2.1 Vady plynule litých polotovarů a ingotů.....	3
2.1.1 Povrchové vady ingotů.....	4
2.1.2 Vnější trhliny v ingotech a bramách.....	5
2.1.3 Povrchové vady bram.....	6
2.1.4 Důsledky vad plynulého lití - třepení a praskání	8
2.2 Moderní trendy plynulého lití.....	9
2.3 Historie TŽ.....	9
2.4 Třinecké Železářny.....	10
2.4.1 Výrobní sortiment blokovny.....	11
3. TEORIE PODÉLNÉHO VÁLCOVÁNÍ.....	13
3.1 Vnější tření při válcování.....	13
3.1.1 Záběrové schopnosti válců.....	14
3.2 Základní oblasti pásma deformace.....	15
3.2.1 Průběh rychlosti a deformace ve skutečném pásmu deformace..	17
3.2.1.1 <i>Průběh rychlosti a napětí po výšce provalku.....</i>	<i>17</i>
3.2.1.2 <i>Průběh rychlosti a napětí po šířce provalku.....</i>	<i>19</i>
3.3 Průběh deformace uvnitř pásma deformace.....	20
3.4 Šíření oceli při válcování.....	23
3.5 Projevy nerovnoměrná deformace.....	24
3.6 Kalibrace na blokovně.....	28
3.7 Vliv různých parametrů na uzavření trhlín.....	30

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	33
4.1 Metalografický rozbor.....	33
4.1.1 Popis experimentu.....	33
4.1.2 Výsledky rozboru.....	34
4.2 Diskuse výsledků.....	35
4.3 Válcování kruhového sochoru.....	36
4.3.1 Popis experimentu.....	36
4.3.2 Cíl experimentu.....	37
4.3.3 Původní kalibrace.....	37
4.3.4 Výsledky válcování podle původní kalibrace.....	39
4.3.4.1 <i>Struktura</i>	38
4.3.5 Nová kalibrace.....	42
4.3.5.1 <i>Výsledky nové kalibrace</i>	44
4.4 Výsledky.....	45
5. ZÁVĚR.....	48

1 ÚVOD

Tváření kovů je teologický proces, při kterém působením vnějších sil dojde v materiálu ke změně rozměrů na požadovaný tvar. Podstatou tváření je vznik plastických deformací, ke kterým dojde po překročení meze kluzu. Tyto procesy mohou probíhat buď za studena (pod rekryalizační teplotou) nebo za tepla, kdy dochází k uzdravovacím procesům a tvorbě nových zrn. Nejrozšířenějším způsobem tváření kovů je válcování, kterým se zpracovává až 95% veškeré vyrobené oceli. Předností tváření je ovlivnitelná změna struktury a tím i mechanických vlastností kovů. Výrobky tváření jsou nedílnou součástí lidské společnosti, používají se pro stavbu nosných konstrukcí nebo železnic a podobně.

Cílem této práce je na základě experimentů a odborných znalostí stanovit příčiny vzniku vnitřních trhlin chrom-molybdenové oceli při válcování sochorů 285x285 a 260x260 mm z plynule litých polotovarů o počátečním průměru 525 mm na blokovně v Třineckých Železárnách a.s. a navrhnout vhodnější technologii pro výrobu.

Ke vzniku trhlin může docházet už při samotném odlévání vznikem podpovrchových bublin, ředin, staženin, segregací.

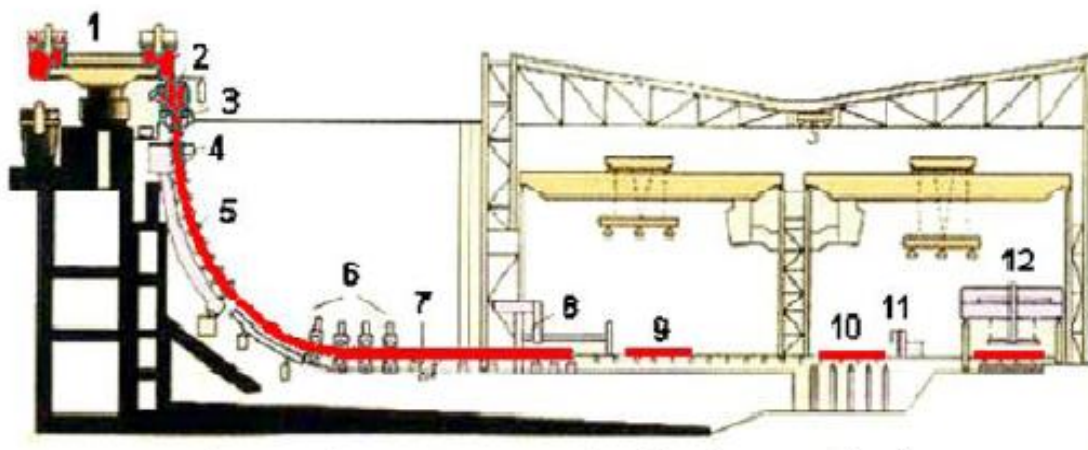
Příčinou vzniku takových vad můžou být: nerovnoměrná deformace, vysoká teplota, dlouhá výdrž na teplotě a možnost přehřátí oceli, nerovnoměrná teplota mezi povrchem a středem v peci při nevhodné poloze vzorku, kdy je umístěn blízko k hořáku a brání tím cirkulaci vzduchu, nízká dotvářecí teplota, nehomogenní chem. složení, nízká poměrná deformace, v jejímž důsledku nedojde k zavaření podpovrchových trhlin.

Následující kapitoly budou zaměřeny na proces a vady plynulého lití, popis společnosti TŽ, nerovnoměrnou deformaci a závěrečné kapitoly porovnají vliv původní a nové kalibrace na pronik plastické deformace.

2 PLYNULÉ LITÍ

Plynulé odlévání oceli je proces, kde odlévaná ocel tuhne do teoreticky nekonečného sochoru, bloku nebo bramy určených pro válcování konečných polotovarů. Plynulé lití přineslo zvýšení kvality oproti odlévání do kokil, kde trhliny vznikaly většinou v teplém stavu po odlití a jejich okolí bylo znečištěno likvacemi a segregacemi. Podélné trhliny vznikají při velké rychlosti lití nebo nesymetrického lití. Příčné trhliny způsobuje povrch kokily, který nedovoluje rovnoměrné ochlazování. Drobnější vady tzv. šupy nebo pleny vznikají rozstříkem oceli při odlévání, kdy velmi rychle utuhnou na stěnách ingotu.

Plynule lité polotovary (kontislitky) jsou rychleji ochlazovány než ingoty, z čehož vyplývá jejich zvýšená chemická i strukturní homogenita a lepší tvařitelnost, proto je tato technologie efektivnější. **Obr. 1.** znázorňuje plynulé odlévání. Zakřivený radiální typ je dnes nejpoužívanější.



Obr. 1: Schéma provozu na plynulé odlévání sochorů, kde: 1-lící pánev 2-mezipánev 3-krystalizátor 4-sekundární chlazení 5-tažné zařízení+sekundární chlazení 6-rovnací zařízení 7-odpojení zaváděcí zátky 8-dělicí zařízení 9- dopravní zařízení 10-příčný dopravník 11-značkovací zařízení 12-skladovací zařízení [1]

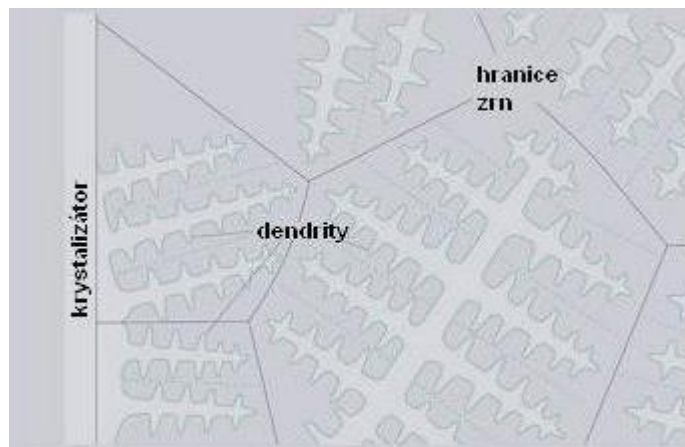
Ocel z elektrických pecí je přelita do pánve, kde se provádí mimopecní zpracování oceli. Poté je dopravena do mezipánve a následně do vodou chlazené formy (krystalizátoru). Tuhnutí začíná ve formě a kontinuálně pokračuje v sekundární zóně a prochází tažnými válci. Pak následuje rovnání a dělení na požadovanou délku.

Důležitými parametry jsou délka stroje, velikost zakřivení, zda sekundární chlazení je vodní nebo vodovzdušné, počet lících proudů a lící rychlost.

2.1 Vady plynule litých polotovarů a ingotů

Segregace - to je koncentrace rozpuštěných nečistot v části kovu, který tuhne poslední.

Dendrity, které se vyvábí (obr. 2.), jsou složeny z téměř čistého kovu, a proto jsou nečistoty postupně víc koncentrovány ve zbývající tavenině [2].



Obr. 2: Dendrity [3]

Menšinová segregace - to je místní koncentrace nečistot na hranicích zrn krystalů a to způsobuje celkovou křehkost odlitku.

Většinová segregace - to je koncentrace nečistot ve střední části ingotu, segregace je uspořádaná do tvaru písmene "V".

Inverzní V segregace - tento typ segregace se může vyskytovat u velmi velkých ingotů. v případě, když je teplotní gradient velmi malý, kov může ztuhnout ve středních částech ingotu jako poslední, což způsobí segregaci ve tvaru obráceného písmene V.

Nekovové vměstky – jsou to zoxidované látky a sulfidy v různých kombinacích mezi sebou. Jsou výsledkem oxidačních reakcí, které se odehrávají během rafinace. Některé reakce mohou být spojeny s erozí pánve či vyzdívky.

Diagonální prasklina - to je výrazná prasklina podél rozhraní dvou jiných ploch krystalizace. Tato prasklina je způsobena tepelnými zátěžemi, které byly přisuzovány oddělenému či nesterjnému sekundárnímu chlazení desek během jejich tuhnutí

Trhlina v půlce ingotu - je trhlina mezi krystaly, vyskytuje se v pozici přibližně uprostřed mezi vnějším povrchem a středem.

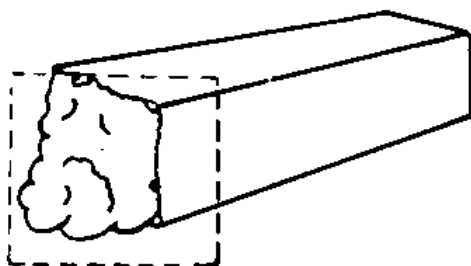
Centrální rozpínavost - to je dutina či pórovitost uvnitř odlitého produktu. Míra defektu závisí na kompozici, velikost, a tvaru produktu, na licích podmínkách, především odlévací teplotě či rozdílné rychlosti stažení.

Trhliny ve tvaru hvězdy - jsou to paprskovité trhliny ve formě hvězdy, vznikají od středu produktu, jsou způsobeny rozdílným sekundárním chlazením.

Válcovací trhliny způsobené stažením – jsou to paralelní příčné vnitřní trhlinky, jsou normálami k ose válcování.

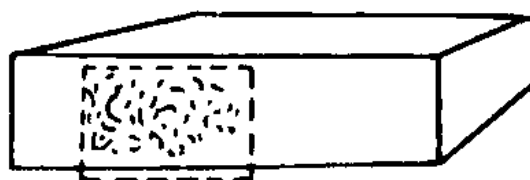
2.1.1 Povrchové vady ingotů

Houbovitý (porézní) vrch – je to nepravidelná erupce oceli na vrcholu ingotu, vyskytuje se po plnění formy (**obr. 3a.**). Je způsobený pozdním vylučováním plynu, během něhož kov příliš zchladl a bránil úniku plynu.



a)

Obr. 3: a) Houbovitý povrch [2]



b)

b) Vlasové trhliny [2]

Píšťala - to je hluboce propadlý vrchol ingotu z neuklidněné oceli. Tento tvar je vytvořený kvůli nadměrnému vylučování plynu během odlévání

Vlasové trhliny - defekt vypadá jako krokodýlí kůže, nachází se na povrchu ingotu odlévaného do opotřebované formy.

Vlnitý povrch - jedná se o sérii nepatrných vnějších zvlnění na povrchu ingotu, způsobené sérií rychle utuhlých vrstev kovu tvořícího se blízko stěny formy, které postupně opět roztávají, jak pokračuje lití. To může být výsledek buď nízké odlévací teploty či nízké lící rychlosti (**obr. 3b.**).

Otřep - je plát utvořený roztavenou ocelí, která se dostala za uvolněnou vyzdívku používanou na nálitek, či mezi formu a překrytý nálitek, či přelitím formy.

Zálup - toto je nepravidelná výduť na kůře ingotu způsobená podtlakem ve formě, či kovem formy ulpívajícím na kůře ingotu.

2.1.2 Vnější trhliny v ingotech a bramách

Trhliny či praskliny v ingotu mohou mít řadu příčin jako:

- Zmenšení povrchu ingotu během ochlazování.
- Neschopnost povrchu k tomu, aby odolala napětí způsobenému ferostatickým tlakem tekuté oceli.
- Příliš vysoká odlévací teplota.
- Příliš vysoká lící rychlost.
- Příliš vysoká teplota formy.
- Příliš velký poloměr zaoblení na ingotu.
- Příliš malá hloubka zářezu na ingotu.

Kromě některých z výše uvedených příčin, mohou trhliny u plynule litých bram být také způsobeny následujícími příčinami:

- Nevhodná konstrukce formy.
- Zkroucení či opotřebování formy.
- Rychlé či nerovnoměrné chlazení ve formě.
- Rychlé či nerovnoměrné sekundární chlazení jiných částí bramy.
- Ohýbání či rovnání bramy při nízké teplotě.

Nejběžnější druhy vnějších trhlín:

- Nedolitek - vyskytuje se, když v ingotu je nesprávně umístěný nálitek.
- Bazální trhliny - vyskytují se, pokud je volné smrštění ingotu bržděno výronkem, nebo přetokem.
- Dvojitá povrchová trhlina - trhlina je obvykle spojená s dvojitým pláštěm.
- Příčná povrchová trhlina - to je trhlina z rohu odlitku napříč jeho plochou.
- Podélná povrchová trhlina - trhlina prochází napříč povrchem ingotu. Může se vyskytovat buď jako rohová trhlina, nebo lícová trhlina.
- Švy - tyto jsou praskliny, které mohou vzniknout, pokud jsou ingoty brzy vyjmuty a vystaveny chladné atmosféře. Tento efekt se nejčastěji vyskytuje u vysokouhlíkové a legované oceli.
- Staženina za tepla - je lokalizované praskání spojené s koncentrací mědi a cínu na hranicích zrn.

2.1.3 Povrchové vady brám

Homogenita předlitků [2, 4] je větší než u ingotů, ale mohou vznikat licí vady ve spojitosti s podmínkami odlévání.

Povrchové vady: podélné trhliny
příčné trhliny

Výskyt podélných trhlín převládá zejména při odlévání nízkouhlíkových uklidněných ocelí. Podporuje ji vyšší obsah síry, vysoké odlévací teploty, rychlosti vychýlení proudu oceli a poškození stěny krystalizátoru.

Příčné trhlín vznikají při nevhodné kombinaci rychlosti lití a teplotou stěn krystalizátoru. Podporují je vyšší obsah uhlíku, síry a stopové prvky.

Kontinuálně lité bramy mohou mít povrchové vady, které jsou připisovány některým specifikám lití. Nejtypičtější povrchové vady tohoto typu jsou uvedeny níže.

Znaky po střídání - vzdálenosti mezi těmito značkami obvykle odpovídají množství produktu, který klesnul v jednom cyklu střídání (**obr. 4a.**).

Falešný povrch - je povrchová nepravidelnost, která se tvoří úplně kolem celého produktu. To je způsobené dočasnou separací povrchu od klesajícího pásu lití (**obr. 4b.**).

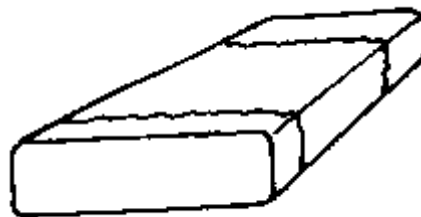
Otlaky od vodítek - je mechanické poškození vyplývající z nepravidelností ve vodítkách, podpoře, ohýbacích či rovnacích válcích. Otlaky od vodítek mohou být také způsobeny vnějším povrchem kovu lepícím se na vodící mechanismus.

Nauhličování - je lokalizované pohlcování uhlíku povrchem materiálu z olejového maziva. Vyskytuje se zvláště při odlévání nízkouhlíkových korozivzdorných ocelí.



a)

Obr. 4: a) *Znaky po střídání* [2]



b)

b) *Falešná stěna* [2]

- Vnitřní trhliny

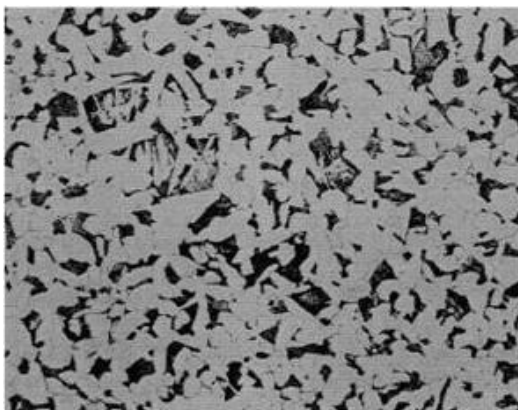
Jsou vnitřním porušením souvislosti materiálu odlitku. Rozsah této vady je rozdílný a v zásadě se řídí velikostí a hmotností odlitku a podmínkami ve výrobní fázi. K vadě může dojít při chladnutí ve formě z vysokých teplot po jeho ztuhnutí. Dojde-li k poruše při nižších teplotách, jde o prasklinu, jejíž rozsah je značně velký [5].

Příčiny vzniku vady

Hlavní příčinou je vnitřní tahové napětí v odlitku, dále tepelné pnutí při fázové transformaci. V odlitku se tento stav napjatosti vyvíjí od konce jeho úplného ztuhnutí, kdy vlivem velkého teplotního gradientu v průřezu stěny a tím intenzivního tepelného toku ze středu k povrchu odlitku, chladnou rychleji vnitřní partie než vnější vrstvy.

- Řediny

Jsou to malé staženiny, vyskytující se v tepelném centru konečné fáze tuhnutí. Tvoří se v tlustších stěnách nebo jejich spojích. Řediny vytvářejí řídká místa ve stěně odlitku, z nichž mohou vycházet kapiláry až k povrchu (**obr. 6.**).



Obr. 5: Řediny [6]

Příčina vzniku vady

Příčinou je objemové smrštění kovu při tuhnutí a technologicky nezajištěné podmínky pro dokonale usměrněné tuhnutí. Ředina vzniká v odlitku již při mírném záporném rozložení teplot v jeho průřezích.

- Středová pórovitost

Nejtypičtější vadou plynulého lití je středová pórovitost. Vznik této vady souvisí s tuhnutím předlitků, kde krystalizace postupuje v podobě protáhlého V. Toto platí obzvláště u kruhových a čtvercových průřezů. Příčinou vzniku je především vysoká odlévací rychlost nebo intenzivní sekundární chlazení (**obr. 7**).



Obr. 6: Ztuhlá mikrostruktura se středovou dutinou [7]

2.1.4 Důsledky vad plynulého lití - třepení a praskání

Při válcování [8, 9] může docházet k praskání důsledkem lící rychlosti a přehřátí oceli

Rozštěpené konce a praskliny válcovaných materiálů jsou vážnými potenciálními problémy během procesů tváření/válcování, protože způsobí zastavení stolice z důvodu jejího ucpání a odmítnutí válcovaného materiálu, stejně jako poškození válců stolice a jejího příslušenství. Nepříznivě působí i velké množství síry. Příměsové prvky v kovech zhoršují tvařitelnost za tepla. Síra tvoří s železem nízkotavitelný sulfid FeS vylučující se na hranicích zrn, čímž za vysokých teplot působí na porušení soudržnosti zrn. Tomuto jevu se zabránuje přísadou Mn do oceli v poměru Mn/S. Avšak i takto vázaná síra způsobuje za vysokých teplot blízkých teplotě solidu přehřátí s trvalým poškozením vlastností oceli. Další parametry jako jsou nekovové vměstky, řediny, jsou zodpovědné za usnadnění vzniku trhlin a šíření.

Z provedených experimentů plyne, že podmínkám pro třepení a praskání při válcování kontinuálně litých sochorů do tyčové oceli se lze vyhnout tím, že:

1. Poměr Mn/S by měl být větší než 35.
2. Stupeň přehřátí tekuté oceli při odlévání by neměl překročit 60 °C.
3. Odlévací rychlost by neměla překročit 3,0 m/min.
4. Poloměr válců, počáteční tloušťka provalku a deformace provalku by měla být optimalizována pro uzavření dutin z plynule odlévaných sochorů.

2.2 Moderní trendy plynulého lití

- Řízený tok v krystalizátoru [10]

Za účelem plynulého lití vysoce kvalitní oceli u sochorů a bloků byla navržena elektromagnetická brzda a elektromagnetické míchání v krystalizátoru. Elektromagnetické produkty radikálně zlepšily kvalitu a produktivitu v plynulém lití a pánvové rafinace.

Forma je důležité zařízení v průběhu kontinuálního licího procesu, odlévací rychlost má nejvýznamnější vliv na tok oceli ve formě a kvalitu výrobku zvláště při vysokých rychlostech lití. Pomocí elektromagnetické brzdy (EMBR) je možné efektivně ovládat rychlost toku oceli ve formě. Když se roztavená ocel pohybuje v magnetickém poli, indukuje se napětí a tyto elektrické proudy v tavenině společně se statickým polem vytváří brzdnu sílu proti pohybu kovu. Čím vyšší licí rychlost, tím vyšší bude rychlost oceli a budou větší brzdící síly. Snížení rychlosti oceli s turbulencí tak napomáhá vměstkům vyplavat na povrch a tím zvýšení čistoty oceli.

2.3 Historie TŽ

Třinecké Železářny patří k průmyslovým podnikům s nejdelší tradicí hutní výroby v České republice. Byly založeny v roce 1839 Těšínskou komorou, kterou v té době vlastnil arcivévoda Karel Habsburský [11].

V roce 1906 se staly Třinecké železářny nejvýznamnější součástí Báňské a hutní společnosti. Z tohoto období pochází také ochranná známka „tři kladiva v kruhu“, která doprovází třinecké hutní výrobky i v dnešní době.

Razantní modernizační politika kapitálově silné Báňské a hutní společnosti záhy změnila podobu železáren. Již ve dvacátých letech 20. století patřily železářny k nejmodernějším hutním závodům s uzavřeným hutním výrobním cyklem ve střední Evropě. V roce 1929 představoval jejich podíl na československé výrobě surové oceli 23 % a válcovaného materiálu dokonce 31 %.

V roce 1946 byly železářny, které nebyly II. světovou válkou významně poškozeny, znárodněny. Rozvoj železáren pokračoval i v období socialistického Československa, kdy se rozvoji těžkého průmyslu přikládal značný význam.

Růst produkce oceli a válcovaného materiálu dosáhl svého historického vrcholu v 80. letech 20. století. Vedle růstu produkce byl důraz také kladen na zavádění moderních hutních technologií. K nejvýznamnějším investicím tohoto období patří vybudování kyslíkové konvertorové ocelárny s následným blokovým a později i sochorovým kontilitím. Od roku

1995 je veškerá ocel vyráběna v konvertorech nebo elektrických obloukových pecích, přičemž 90 % vyrobené oceli je kontinuálně odléváno.

Třinecké železářny jsou dnes hutním podnikem s uzavřeným hutním výrobním cyklem, jejichž hlavní výrobní program tvoří dlouhé válcované výrobky. V roce 1991 byly Třinecké železářny převedeny na státní akciovou společnost. V průběhu let 1994–1996 byla kapitálová účast státu v železárnách postupně snižována. Od roku 1996 jsou Třinecké železářny zcela odstátněny a jejich majoritním vlastníkem je akciová společnost Moravia Steel.

Součástí skupiny Třinecké Železářny Moravia Steel jsou další dceřiné společnosti, které vznikly v průběhu procesu restrukturalizace Třineckých Železáren a také nové akvizice. Mezi nejvýznamnější patří Energetika Třinec, a.s., Strojírny Třinec, a.s., Slévárny Třinec, a.s., Refrasil, s.r.o., Řetězárna, a.s., Sochorová válcovna TŽ, a.s., Ferromoravia, s r.o. a Vítkovice Válcovna trub a.s.

2.4 Třinecké Železářny

Výrobní program válcoven byl postupem doby orientován na produkci dlouhých válcovaných výrobků. Současnou produkci válcovaného zboží zabezpečuje blokovna, na kterou navazuje vratná trať a šest hotovných válcovacích tratí, kterými jsou střední, kontijemná a kontidrátová trať v Třinci, sochorová válcovna v Kladně, univerzální válcovna v Bohumíně a válcovna trub v Ostravě-Vítkovicích.

Válce blokovny [11] o průměru 960 mm a délce 2250 mm válcují kontislitky, které se ohřívají v krokové peci (schéma tratě na **obr. 7.**) nebo ingoty, které jsou ohřívány v hlubinných pecích. Blokovna pracuje v cyklu s vratnou tratí. Výrobní program blokovny tvoří předvalky (bloky) a bramy k dalšímu zpracování. Ohřev v krokové peci zajišťuje dobré prohřátí předlitků a dosažení maximální teploty v co nejkratší době. Tím dochází k minimálnímu oduhličení. Vratná trať má čtyři duostolice v otevřeném uspořádání. První stolice slouží pouze pro válcování sochorů. Na vstupu do předhotovni a hotovni stolice je instalován vysokotlaký ostřík okují. Předepsaná válcovací teplota je kontrolována automatickým systémem řízení (ASŘ). Sortimenty litých a válcovaných polotovarů jsou uvedeny v **tabulkách 1-4.**

2.4.1 Výrobní sortiment blokovny

Tabulka 1: Kontislitky [11]

Konstislitky	
Rozměry	Délky
350 x 300 mm	4 – 6,5 m, po dohodě do 8 m
320 x 250 mm	4 – 6,5 m, po dohodě do 8 m
ø 320 mm	2,5 – 6,4 m
ø 410 mm	2,5 – 6,4 m
ø 525 mm	2,5 – 6,4 m
150 x 150 mm	10 – 12 m

Tabulka 2: Bloky [11]

Bloky	
Rozměry	Délky
160 × 160 mm	2 m – 6 m (výjimečně od 1,2 m)
170 × 170 mm	
180 × 180 mm	
190 × 190 mm	
200 × 200 mm	
210 × 210 mm	
220 × 220 mm	
250 × 250 mm	
280 × 280 mm	

Tabulka 3: Bramy [11]

Bramy	
Rozměry	Délky
190 - 520 × 120 - 200 mm	2 m – 6 m (výjimečně 1,2 m)

Tabulka 4: Sochory [11]

Sochory	
Rozměry	Délky
100 × 100 mm	2,8 m – 3,2 m (výjimečně od 2,5 m) 10 m – 12 m (výjimečně od 8 m)
108 × 108 mm	
110 × 110 mm	
130 × 130 mm	
150 × 150 mm	

Konvertorová ocel je odlévána na dvou kontilitích, z nichž první je blokové o pěti proudech a druhé sochorové o osmi proudech. Blokové kontilití vyrábí také kruhové kontislitky. Výroba sochorového kontilití je dále intenzifikována zavedením tzv. konvexní kokily.

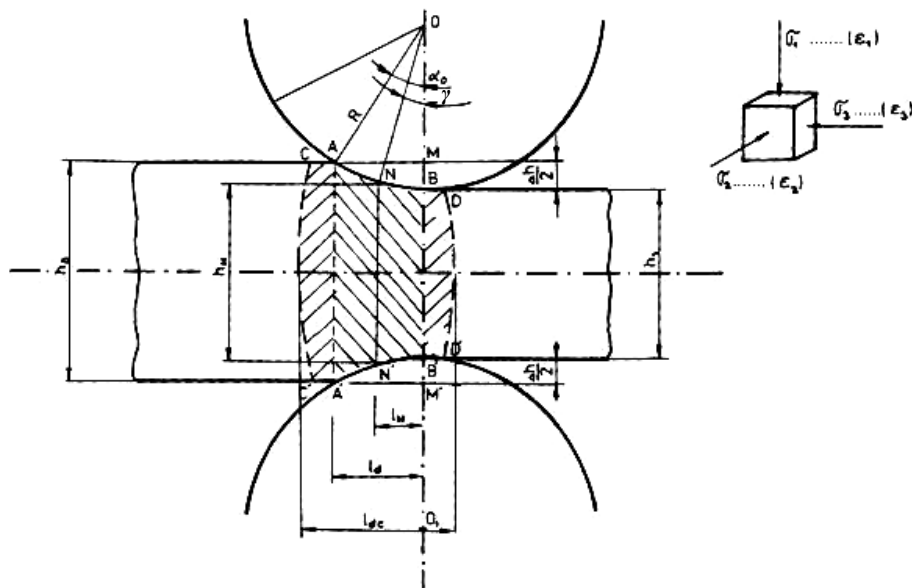
Velmi žádaným produktem je kruhový kontislitek o průměru 525 mm. Kontinuálně lité sochory jsou především vstupním materiálem pro kontijemnou, kontidrátovou i střední válcovnu.



Obr. 7: Schéma blokovny [12]

3 TEORIE PODÉLNÉHO VÁLCOVÁNÍ

Válcování [13] je spojitý proces, při kterém se polotovar válcuje ve směru podélné osy mezi střídavě se otáčejícími válci. Dochází tím k výškovému úběru, tento děj probíhá v oblasti pásma deformace. Podle **obr. 8** je to v řezu plocha ohraničená přímkami AA'-BB'.



Obr. 8: Pásma deformace při podélném válcování [13]

Plastická deformace však probíhá i mimo toto pásmo a to v oblasti znázorněné jako CC'-AA' tzv. pásmo vznikající deformace a v oblasti BB'-DD' tzv. pásmu zanikající deformace. Skutečné pásmo deformace vymezuje v řezu plocha CC'-DD'. Délka skutečného pásma deformace l_{dc} je 1,2-1,7krát větší, než geometrické pásmo deformace l_d . Pásmo deformace charakterizuje: úhel záběru α_o , úhel neutrální roviny γ , poloměr válců R , vstupní a výstupní výška h , l_d - horizontální průmět stykového oblouku AM nebo A'M' a neutrální rovina N.

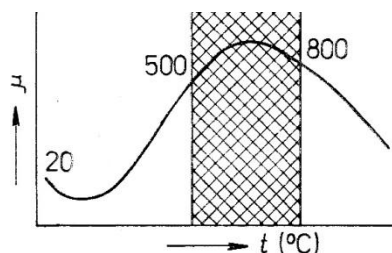
3.1 Vnější tření při válcování

Při styku provalku s pracovními válci vznikají třecí síly, které více či méně ovlivňují parametry válcování. Třecí síly umožňují záběr kovu. Při válcovacím procesu mají vesměs negativní vlivy. Zvyšují nerovnoměrnost deformace a jsou příčinou vzniku tahových napětí.

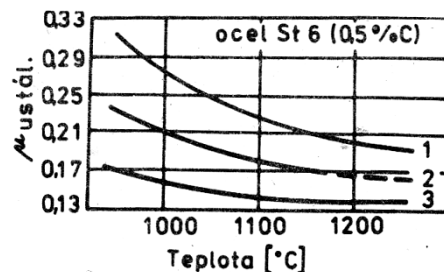
Zvyšují válcovací síly a ovlivňují tok v mezeře válců, což se projevuje snižováním prodlužování. Naopak uplatnit se můžou v kalibračních válcích, kde umožní lepší zaplnění kalibru.

Působením vnějšího tření dochází k nerovnoměrnému zpevnění a k uzdravovacím procesům, což se projeví různými mechanickými vlastnostmi a velikostí zrna. Při překonávání tření se zvětšují deformační odpory a opotřebení válců, protože je potřeba větších válcovacích sil.

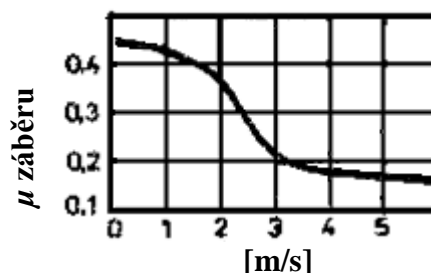
Pro posouzení vnějšího tření se zavádí součinitel vnějšího tření μ , který nejvíce závisí na drsnosti povrchu válce (**obr. 9.**), povrchu tvářeného kovu a jeho chemickém složení, tvářecí teplotě (**obr. 10.**). Dále na druhu maziva a rychlosti válcování (**obr. 11.**), kde snížením počtu otáček a tím snížení rychlosti, součinitel vnějšího tření vzrůstá, což se využívá pro zlepšení záběrových schopností válců [4, 13].



Obr. 10: Vliv souč. tření na teplotě [4]



Obr. 9: Vliv jakosti povrchu válců na souč. tření; 1-rýhované ocelové válce, 2-pro válce s nalepenými částmi kovu, 3-hrubě broušené válce [14]



Obr. 11: Závislost souč. tření na obvodové rychlosti válců [14]

Maximum mezi teplotami 500 a 800 °C má souvislost s intenzívním vznikem okují. Při teplotách nad 800 °C, se již teplotní závislost bere jako lineární.

3.1.1 Záběrové schopnosti válců

Válcování probíhá ve třech stádiích [13]. V prvním stádiu se zaplňuje pásmo deformace, v druhém je již pásmo deformace zaplněné a vznikají tuhé konce a ve třetím stádiu dochází k vyprázdnění pásma deformace. Při záběru kovu válcí ovlivňuje záběrové schopnosti součinitel smykového tření mezi provalkem a povrchem válců. Základní podmínkou záběru kovu je, aby třecí úhel, byl větší než záběrový a aby výslednice sil působila směrem k výstupní rovině. Při válcování v kalibrech zlepšují záběrové schopnosti přitlačné síly od bočních stěn kalibru. Ve skříňových kalibrech se záběrové schopnosti v zlepšují stlačením kovu bočními stěnami.

$$v = b/b_k \quad (1)$$

kde b – šířka provalku, b_k – šířka dna kalibru

Možnosti změny záběrových schopností:

- změnou součinitele μ
- přidavnou horizontální silou
- změnou parametrů D , Δh , h_0
- zvětšením průměru válců, snížením úběru, snížení tloušťky

Fyzikální podmínky záběru jsou funkcí: [14]

$$\beta = f(t, \Delta v, m, t_{vrd}, h_s) \quad (2)$$

kde β – záběrový úhel, t – teplota válcování provalku, v – relativní rychlost mezi provalkem a válcem, m – vliv chem.složení a stavu kovu, t_{vrd} – tvrdost povrchu pracovních ploch válců, h_s – střední drsnost povrchu pracovních ploch válců

3.2 Základní oblasti pásma deformace

Pásma deformace [13,15] lze rozdělit na 7 oblastí (**obr. 12.**). Při válcování za tepla dochází v oblasti pásma přilnutí l_p k vyrovnání rychlostí provalku. Platí, že:

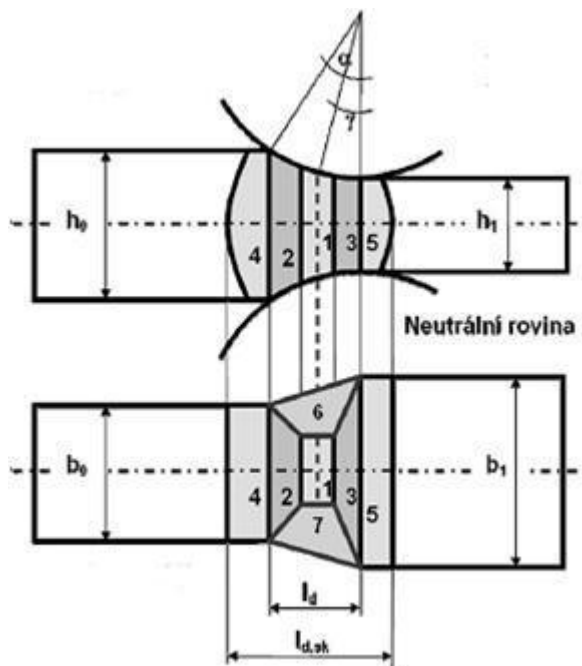
$\langle l_d/h_s, \rangle l_p \rangle h/b, \rangle \mu, \rangle \Delta h$; kde h -výška, b -šířka

V oblasti zpoždování dochází k proklouzávání provalku, takže rychlost provalku v_p je menší, než obvodová rychlost válců v_v , provalek se relativně pohybuje proti směru válcování.

$$v_p < v_v \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

Pro výstupní rovinu bude platit:

$$v_p > v_v \cdot \cos \varphi \quad (4)$$



Obr. 12: Základní oblasti pásma deformace; 1- pásmo přilnutí 2- pásmo opožďování 3- pásmo předstihu 4- pásmo budící se deformace 5- pásmo dozívající deformace 6-7 pásmo šíření a neutrální rovina dána úhlem γ [15]

což znamená, že provalek se pohybuje rychleji, než obvodová rychlost válců. Čím větší bude úhel neutrální roviny γ větší, tím víc se zvýší prodloužení pásma předstihu. Velikost předstihu se zvětšuje se zvětšováním úběru tloušťky Δh , se zvětšujícím se poloměrem válců. Při malém poměru b/h převládá příčný tok kovu, naopak při velkém poměru b/h (tlusté plechy) se šíření zanedbává a předstih se zvětšuje.

Následkem nerovnoměrné deformace l_d/h_s mohou vznikat rozdíly předstihu mezi povrchem a jádrem provalku. Předstih v kalibrech je nerovnoměrný, jeho střední hodnota je vyšší než na hladkých válcích. Je to způsobeno tím, že se zvětšuje úhel α_N , zvětšují se boční síly od stěn kalibrů a omezuje se šíření.

Oblasti 4 a 5 na (**obr. 12.**) vyjadřují vztahy mezi tuhými konci a pásmem deformace, čímž se prodlužuje jeho délka za jeho geometrické hranice. Skutečné pásmo deformace se zvětšuje s velikostí úběru (zásadní vliv), snížením rychlosti válcování a zvýšením součinitele μ . Vliv poměrné deformace je uveden v **tab. 5.**

V oblastech šíření 6, 7 dochází vlivem příčného toku kovu ke změně stavu napjatosti z (— — —) nerovnoměrný tlakový stav se mění na (— — +). Se zvětšením rychlosti válcování je šíření menší.

Tabulka 5: Délka IV a V pásma deformace a skutečného pásma deformace v závislosti na úběru [13].

Úběr $\varepsilon_h(\%)$	Délka pásma		Poměr l_{dc}/l_d
	IV	V	
6,7	$0,05 l_d$	$0,04 l_d$	1,09
16,9	$0,11 l_d$	$0,08 l_d$	1,19
25,3	$0,16 l_d$	$0,1 l_d$	1,26

3.2.1 Průběh rychlosti a deformace ve skutečném pásmu deformace

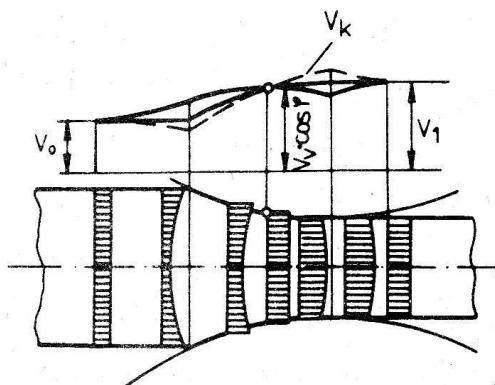
Při válcování dochází působením tuhých vnějších konců k nerovnoměrné deformaci, rozdělení rychlosti i napětí. Na hladkých válcích při velké šířce provalku nastávají dva mezní případy:

- $l_d/h_s < 0,5 - 1,0$
- $l_d/h_s > 0,5 - 1,0$

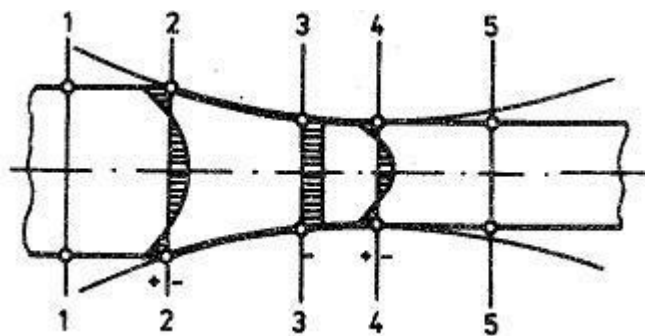
3.2.1.1 Průběh rychlosti a napětí po výšce provalku

- $l_d/h_s > 0,5 - 1,0$

Průběh válcování [14] je charakteristický tím, že tlakové napětí proniká i do jádrových částí kovu a deformace je při větším poměru l_d/h_s zrovnoměrněna. V oblasti zpoždování je rychlost provalku menší než rychlost válců ve směru osy x ($v_p < v_v \cdot \cos\varphi$) třecí síly se snaží urychlit povrchové části kovu, v oblasti předstihu ($v_p > v_v \cdot \cos\varphi$) je brzdí. V obou případech ovlivňuje rozdíly v rychlostech povrchových a jádrových částí provalku (**obr. 13.**).

**Obr. 13:** Schéma rychlostí kovu po výšce pásma deformace [14]

Skutečný průběh rychlosti provaľku má tento charakter: v oblasti 4 (**obr. 14.**) se následkem třecích sil urychlují povrchové částice vzhledem k jádrovým, tento rozdíl vzrůstá v pásmu zpoždění a směrem k oblasti neutrální roviny zaniká. Působením tuhých konců dochází před oblastí 4 a za oblastí 5 k úplnému vyrovnání rychlostí, takže provaľek vstupuje i vystupuje po výšce rovnoměrnou rychlostí. Následkem rychlostních rozdílů vznikají doplňková napětí. Na povrchu vznikají vlivem rozdílných rychlostí tahová napětí a v jádru vznikají tlaková napětí, protože dochází ke zpoždění rychlostí jádrových částí, které jsou pod tlakem relativně rychleji se pohybujících částí před pásmem deformace. V oblasti předstihu jsou tlaková napětí způsobena reakcí rychleji se pohybujících jádrových částí s tuhými konci s menší rychlostí.

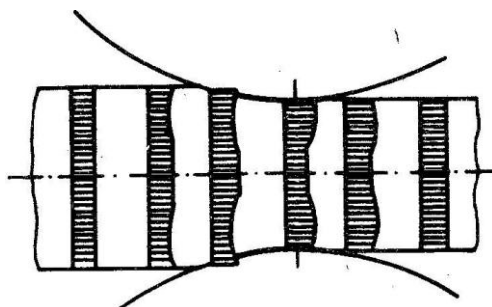


Obr. 14: Průběh normálových napětí v pásmu deformace při poměru $l_d/h_s > 0,5 - 1,0$; 1-1 a 5-5 roviny, ve kterých je napětí 0, 2-2 vstupní rovina, 3-3 neutrální rovina 4-4 výstupní rovina (+ tahová a – tlaková napětí) [14]

- $l_d/h_s < 0,5 - 1,0$

Se zmenšujícím se poměrem l_d/h_s se vliv tuhých konců uplatňuje výrazněji a zvětšuje se stupeň nerovnoměrnosti deformace a velikost doplňkových napětí. Deformace se soustřeďuje hlavně v podpovrchových částech a při malých poměrech l_d/h_s neproniká do středu. Průběh vodorovných rychlostí má v závislosti na hloubce proniknutí deformace odpovídající průběh. Urychlení či zbrzdění rychlostí následkem třecích sil je omezeno do určité hloubky pod povrchem (**obr. 15.**).

V jádrových oblastech vznikají následkem většího prodlužování podélná tahová napětí, jejichž velikost se zvyšuje s vyšším stupněm nerovnoměrné deformace. Do určité hloubky pod povrchem převládají tlaková napětí.



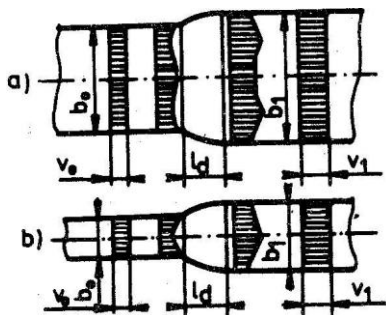
Obr. 15: Schéma vodorovných rychlostí kovu po výšce pásma deformace [14]

3.2.1.2 Průběh rychlostí a napětí po šířce kovu

Na rozdělení rychlostí, napětí i měrných tlaků má rozhodující vliv šířka provalku. Následkem urychlování a brzdění povrchových částí a příčného toku kovu dochází ke změnám velikosti dopředné rychlosti. Její průběh v závislosti na šířce ukazuje **obr. 16**.

V závislosti na velikosti šířky mohou nastat 3 případy:

- $b_{stř} < l_d$: úzké vývalky – tlaková napětí se kumulují ve středové oblasti, na bocích jsou tahová napětí, zvětšující se u krajů
- $b_{stř} = (1-4) \cdot l_d$: středně široké vývalky – tlaková napětí se rozšiřují ve střední části
- $b_{stř} > l_d$: široké vývalky – tlaková napětí, vyrovnávají tahová napětí nedosahující do středových oblastí

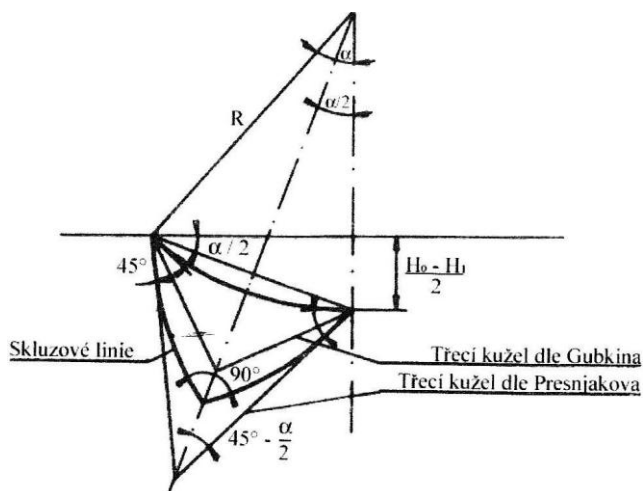


Obr. 16: Schéma rozložení rychlostí po šířce provalku;

a) široký provalek, b) úzký provalek [14]

3.3 Průběh deformace uvnitř pásma deformace

Následkem třecích sil mezi provalkem [13, 14] a válcí vzniká oblast ztížené deformace, která má kuželovitý tvar, a jejíž délka závisí na délce pásma přilnutí. V této oblasti je prostorový stav nerovnoměrné tlakové napjatosti (– – –) s malými rozdíly hlavních napětí σ_1 , σ_2 , σ_3 . Rozdíl napětí $\sigma_1 - \sigma_3$ je zpravidla nižší, než je hodnota $\beta\sigma_p$, nutná pro vznik plastické deformace ($\sigma_1 - \sigma_2 \geq \beta\sigma_p$). Za oblastí tzv. třecích kuželů, kde se třecí síly výrazně neuplatňují, je oblast intenzivní deformace. Tato oblast se při prostorovém stavu tlakové napjatosti vyznačuje dostatečnými rozdíly napětí $\sigma_1 - \sigma_3$, vyvolávajícími intenzivní plastickou deformaci. Směrem do středu tloušťky se napětí σ_1 postupně snižuje, a tak, u tlustostěnných vývalků může v těchto částech rozdíl napětí $\sigma_1 - \sigma_3$ klesnout pod hodnotu $\beta\sigma_p$. V pružně namáhaném tělese nastává deformace při napětích τ_{\max} , umístěných pod úhlem 45° k působící síle. Skluzové čáry se protínají pod úhlem 90° . Představu skluzových čar podle S.I.Gubkina je znázorněn na (obr. 17.).



Obr. 17: Skluzové čáry v pásnu deformace podle S.I.Gubkina a A.Presnjakova [13]

Hloubku proniknutí tlakové deformace podporuje (viz. obr. 18.):

- větší úběr tloušťky
- vyšší součinitel smykového tření
- větší poloměr válců
- větší délka pásma přilnutí

Délka pásma přilnutí l_p a její poloha má značný vliv na tok kovu v mezeře a na energosilové podmínky. Při válcování za tepla se délka pásma přilnutí stanoví jako:

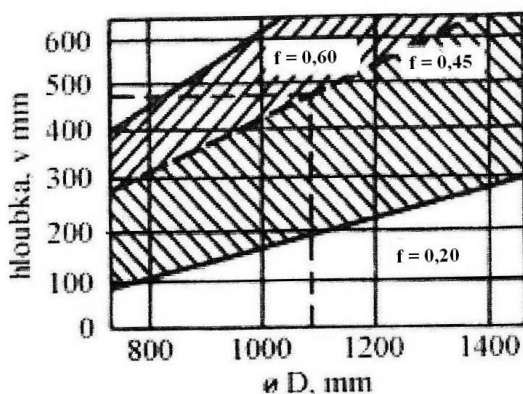
$$l_p = (0,5 - 2)h \quad (5)$$

kde h – je výška provačku

Délku pásma přilnutí l_p zvětšuje:

- snížený poloměr l_d/h_s ,
- zvětšený poměr h/b ,
- zvýšený součinitel smykového tření,
- zvětšený úběr,
- zvětšená rychlost válcování.

Rozhodující vliv mají l_d/h_s a μ . Při poměru $l_d/h_s > 3$ (ploché vývalky) převládá prokluzování v záběrovém oblouku.



Obr. 18: Vliv průměrů válců D a součinitele smykového tření f na hloubku proniknutí plastické deformace y [13]

V podmínkách nerovnoměrné deformace tj. $l_d/h_s < 0,6-0,8$ se oblast přilnutí prodlužuje, plastická deformace začíná ve větší vzdálenosti od geometrického pásma deformace a nedosahuje až do jádra.

Vzorec pro výpočet proniknutí plastické deformace:

a) Gubkin [16]

$$y = \frac{h_0 - h_1}{4} \cdot \left(\cot g \frac{\alpha}{2} - 1 \right) \quad (6)$$

b) Presnjakov

$$y = \frac{R(1-\cos\alpha)}{2} \left\{ \cot g \frac{\alpha}{2} \left[1 + \frac{\left(\frac{1}{\sin(45-\frac{\alpha}{2})} - 1 \right)}{2} \right] - 1 \right\} \quad (7)$$

Z rovnice vyplývá, že hloubka proniku deformace je závislá na poloměru válců a velikosti úběru.

Význam výpočtu y : - přibližný model plastické deformace

návrh optimálních rozměrů tvářecího nástroje

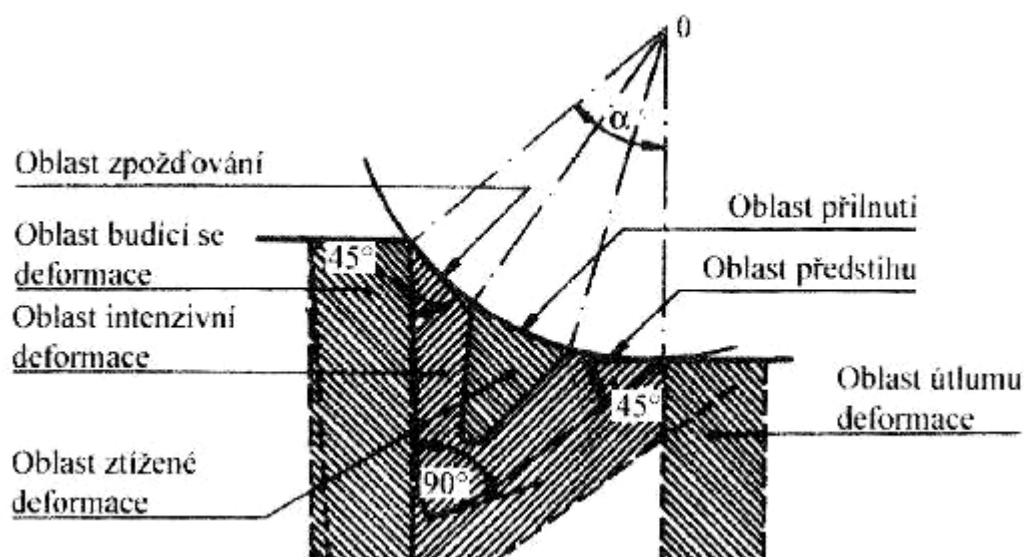
optimální podmínky tváření

Vzorec pro výpočet R (zajištění protváření jádra kovu)

$$\text{Gubkin: } R_{\min} = \frac{(h_0 + h_1)^2}{16(h_0 - h_1)} \quad (> 2x) \quad (8)$$

$$R_{\max} = \frac{(h_0 + h_1)^2}{h_0 - h_1} \quad (< 0) \quad (9)$$

Rozdělení deformovaného objemu kovu v podélném směru pásma deformace na jednotlivé oblasti odpovídá vnitřnímu uspořádání pásma deformace na **obr. 19**.



Obr. 19: Vnitřní uspořádání pásma deformace podle A.A. Presnjakova [14]

3.4 Šíření oceli při válcování

Příčný tok kovu v mezeře válců [4] je přírůstek šířky provalku po jeho průchodu válci. Šíření je volné, omezené a nucené. Z hlediska dosažení požadovaného tvaru vývalku může být šíření užitečným jevem při válcování různých profilů, kdy je šíření nutné pro dosažení žádaných tvarů. Nebo nevídaným jevem při zmenšování šířky provalku. Šíření však vždy způsobuje snížení tvařitelnosti, protože ve volně se širících částech vzniká tahové napětí. To je nebezpečné při válcování v litém stavu na hladkých válcích.

Z rovnice stálosti objemu vyplývá, že:

$$h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1 \Rightarrow \frac{h_0}{h_1} = \frac{b_1 \cdot l_1}{b_0 \cdot l_0} \quad (10)$$

$$\text{neboli } \frac{1}{\gamma} = \beta \cdot \lambda$$

což znamená, že při dané redukci výšky je stupeň šíření tím větší, čím menší je stupeň prodloužení. Pro tok kovu platí zákon nejmenšího odporu (nejmenší odpor tečení).

Činitelé mající vliv na šíření – na velikost šíření mají vliv geometriční činitelé, jako výška a příčný průřez pásma deformace, šířka kovu, délka pásma deformace a poloměr válce. A také fyzikální činitelé, jako součinitel vnějšího tření, válcovací teplota, chemické složení oceli a její mechanické vlastnosti, rychlost válcování a rychlost deformace. Současné působení obou činitelů má vliv na stav napjatosti a charakter změn deformace.

Vliv velikosti deformace výšky – při celkové deformaci je šíření tím větší, čím většími úběry se celkové deformace dosáhlo (při válcování s více průchody bude šíření menší, než při jednorázovém úběru).

Vliv šířky provalku – se zvyšující se šířkou se šíření zvětšuje do určitého maxima a potom zase klesá. Příčinou je větší styková plocha tangenciálního napětí v příčném směru, takže odpor kovu je menší v podélném směru.

Vliv chemického složení oceli – nejvíce šíří při válcování homogenní feritické oceli, následují chromové a křemíkové oceli. Přítomnost feritu v ocelích výrazně zvětšuje šíření.

Vliv průměru válců – se zvyšujícím se průměrem válců se velmi značně zvyšuje šíření. Důvodem je zvětšení záběrového oblouku, což podporuje tečení kovu v příčném směru.

Vliv tření – se zvětšujícím se součinitelem tření se šíření zvětšuje, protože se zvětšují třecí síly, které brání pohybu kovu vpřed. Na vnější šíření má vliv jakost válců a složení okují.

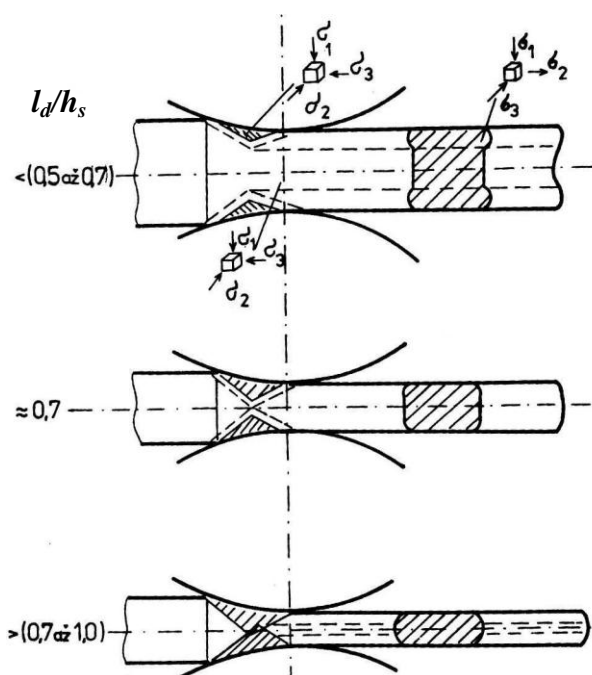
Vliv rychlosti válcování – menší rychlost vyvolá větší šíření.

Vliv teploty – pokud je provalek rovnoměrně ohřátý, nemá teplota vliv na šíření. Méně ohřátý kov má však větší šíření než teplejší. Studenější provalek klade větší deformační odpor, a proto způsobuje větší skok válců.

3.5 Projevy nerovnoměrná deformace

Nerovnoměrnou deformaci způsobují nejen třecí síly a tuhé konce, ale i různý poměrný úběr po délce a šířce styku tvářecího nástroje a kovu [4, 14].

Charakteristické případy pronikání deformace po výšce průřezu a tvar koncových částí jsou uvedeny na **obr. 20**.



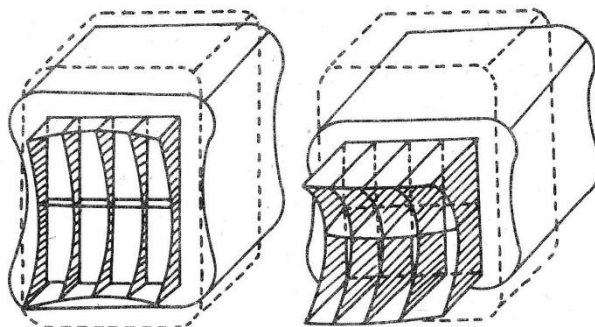
Obr. 20: Schéma vlivu poměru l_d/h_s na pronik deformace a na tvary bočních a koncových částí [13]

Při malém poměru $l_d/h_s < 0,2$ neproniká výšková deformace do středu průřezu, šíření nastává jen v blízkosti styčné plochy provalek s válcem a směrem ke středu dochází k zúžení styčné plochy.

Se zvětšením geometrického poměru $l_d/h_s \approx 0,7 - 0,8$ zasahuje výšková deformace střední vrstvy a může se dosáhnout stejného rozšíření po celé výšce kovu.

Při dalším zvětšení poměru $l_d/h_s > 0,8 - 1$, vzniká maximální šíření a maximální výšková deformace. Koncová část dostává soudkovitý tvar.

Nerovnoměrnost rozložení výškové deformace při malém a velkém úběru tlustého provalku je patrné z (**obr. 21.**).

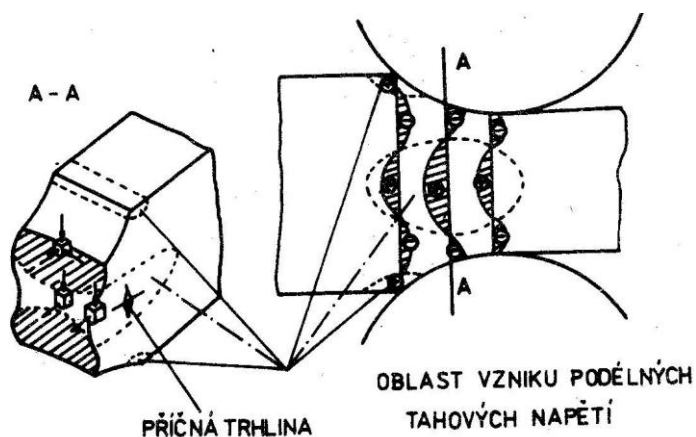


Obr. 21: Nerovnoměrné rozložení výškové deformace [4]

V obou případech je výšková deformace nerovnoměrná jak po výšce tak i šířce, tato deformace je největší v dotykové vrstvě a snižuje se směrem ke střední vrstvě. Ve střední vrstvě se vliv deformace mění v závislosti na úběru.

Při válcování ingotů na blokovně dochází ke vzniku dvojité soudkovitosti bočních obrysů kovu, což je projevem nerovnoměrného rozložení deformace po výšce tvářeného provalku.

Nerovnoměrnost rozdělení výškové a příčné deformace po příčném průřezu tlustého provalku podmiňuje vznik složitého napětového stavu. Jak ukazuje (**obr. 22.**),

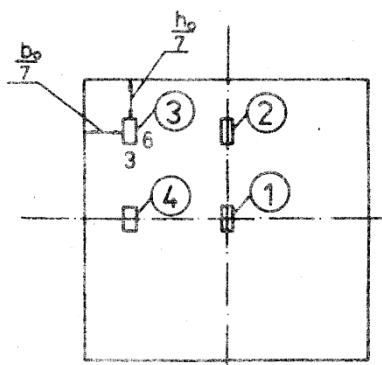


Obr. 22: Rozdělení stavu napjatosti při válcování tlustého provalku; + tah, - tlak [4]

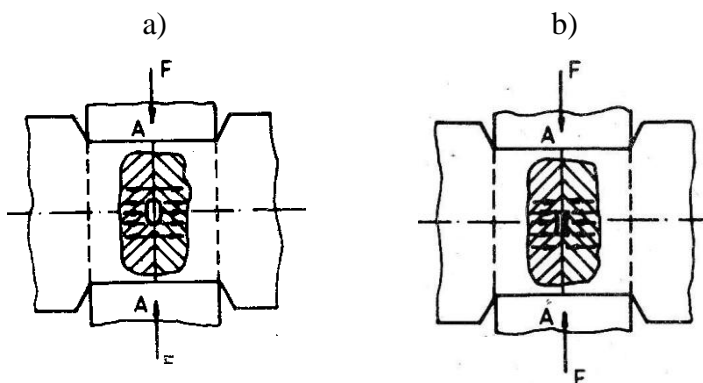
největší tahová napětí vznikají na bočních plochách, proto při válcování ingotů na blokovně vznikají trhliny.

Má-li provalok v provozních podmínkách po průchodu válci tvar dvojitého soudku, svědčí to o tom, že ve střední části působila tahová napětí.

Předpokládá se, že šíření plastických deformací odpovídá určitému stavu napjatosti. Pro zkoumání této souvislosti byl navržen pokus pro krychli (**obr. 23.**), v jejichž stěnách byly vyfrézovány dutiny, které představovaly vady. Tvar dutiny působením vnější síly se bude pod vlivem určitého tahového nebo tlakového napětí zvětšovat nebo zmenšovat (**obr. 24.**). Za jistých podmínek se původně rovinný tvar dutiny stává vydutým a šířka vady se zvětšuje působením podélných tahových napětí vyvolaných nerovnoměrností deformace po výšce průřezu. Jsou-li v okolí vad podélná tlaková napětí, mění se původně rovinný tvar dutiny na vypuklý a dutina se postupně uzavírá. Tváření probíhá v oblasti rovnoměrnější deformace a velikost vady se postupně uzavírá. Za vhodných podmínek určených teplotou kovu, stupněm deformace může dojít k úplnému zavaření vady.

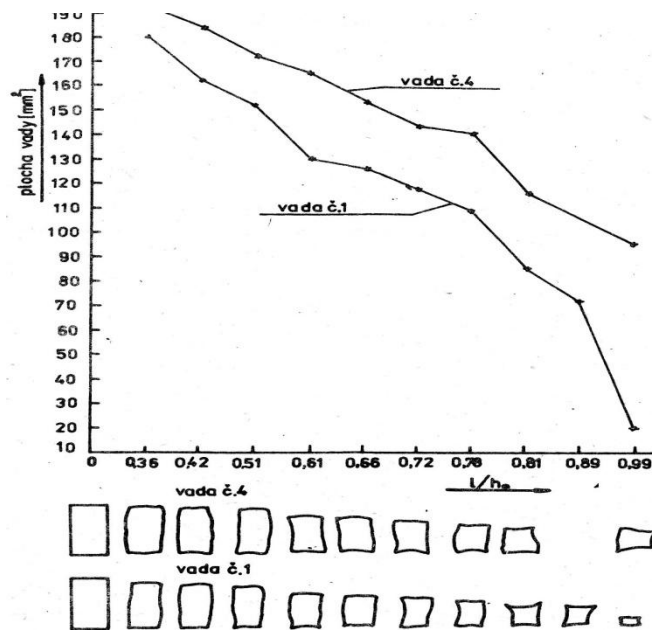


Obr. 23: Plocha uměle vytvořených vad 1a4 – centrální dutiny, 2a3 – v blízkosti povrchu [14]



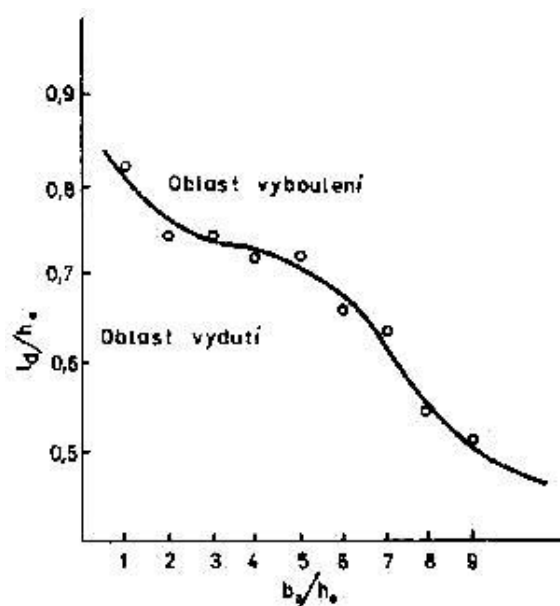
Obr. 24: Tvar dutiny pod vlivem [14]
a) tahových b) tlakových napětí

V okolí vad 2 a 3 i při menších poměrech l_d/h_s jsou v příčném řezu podélná tahová napětí. U vad 1 a 4 (**obr. 25.**) dochází při poměru $l_d/h_s > 0,8$ k vyrovnání obou napětí a za touto hranicí se zcela utlumí tahová napětí ve střední části vzorku, a tím se vada začíná uzavírat. S narůstajícím poměrem l_d/h_s lze určit, přechod od podélných tahových napětí k podélným tlakovým napětím a pozorovat zmenšení vady 1 ve střední části a vady 4 blíže k okraji.



Obr. 25: Průběh změny vady 1 a 4 s různým poměrem l_d/h_s [14]

Při tváření tlustostěnných vývalků (obr. 26.):



Obr. 26: Průběh křivky oddělující oblast vydutí od bočního vyboulení [14]

Z diagramu je patrný vliv zvětšujícího se poměru stran b_0/h_0 na velikosti l_d/h_s . Stoupající poměr stran b_0/h_0 (válcování tlustých plochých vývalků) ovlivňuje velikost poměru l_d/h_s pro dosažení určitého zrovnoměnění deformace tím, že se velikost poměru l_d/h_s snižuje až na hodnotu 0,5-0,6.

3.6 Kalibrace na blokvně

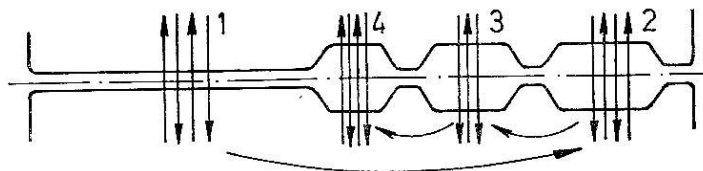
Bloky se na blokvně [4] válcují na hladkých válcích a ve skříňových kalibrech (**obr. 30.**). Velikost úběru je dána podmínkami záběru, tvařitelnosti kovu, válcovací armaturou. Pro správné sestavení kalibrů je nutné znát velikost šíření, to je patrné už při třetím průchodu a nejvíce v posledních dvou průchodech. Pro správnou jakost je důležité hranění. Osvědčil se tento způsob:

- první hranění po dvou až třech průchodech
- další hranění se provádí, když poměr stran b/h dosáhne hodnoty 1,3 na hladkém válcí, případně 1,7-2 v kalibrech. Při překročení těchto hodnot hrozí zkosení průřezu provalku
- poslední hranění – před posledním průchodem

Rozložení kalibrů na blokvně: a) postupné (**obr. 27.**)

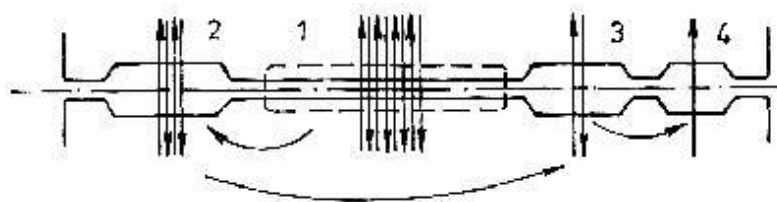
b) symetrické (**obr. 28.**)

a) velká hloubka kalibru omezuje volné šíření kovu, a tím zabraňuje vzniku trhlin a podporuje prodloužení kovu. Hluboké zářezy ovšem snižují pevnost válce, to se kompenzuje větším nominálním průměrem válce a také tím, že největší skříňový kalibr se umístí na konec.



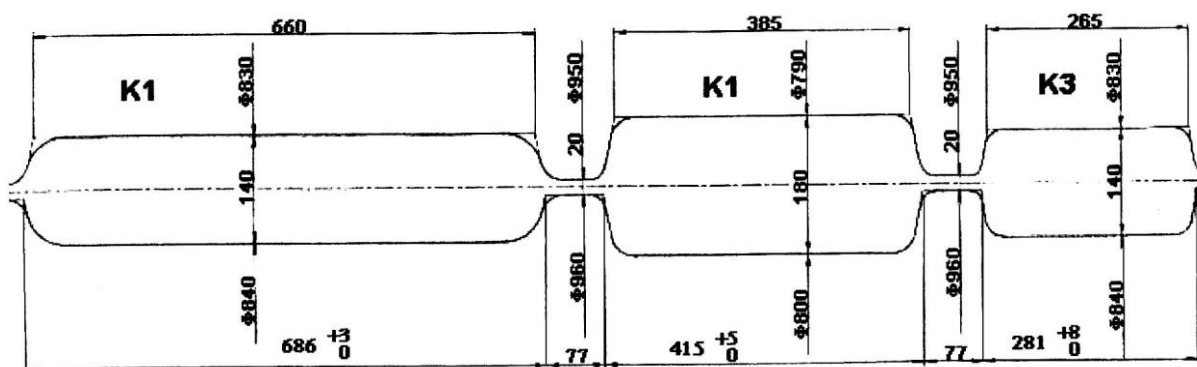
Obr. 27: Postupné rozložení kalibrů pro válcování bloků a bram [4]

b) hladká část je umístěna uprostřed těla válce, skříňové kalibry jsou po stranách. Kalibrace je vhodná pro válcování bloků i bram. Výhodou jsou menší zářezy, lepší podmínky pro válcování armatury – čepy a ložiska jsou méně zatížena, protože opadávání okují už nezvyšuje válcovací síly. Nevýhody spočívají ve volném šíření kovu na hladké části, což způsobuje vznik trhlin a horší a delší manipulace s materiálem.



Obr. 28: Symetrické rozložení kalibrů pro válcování bloků a bram [4]

Schéma pracovních válců se skříňovými v TŽ je na (obr. 29.).

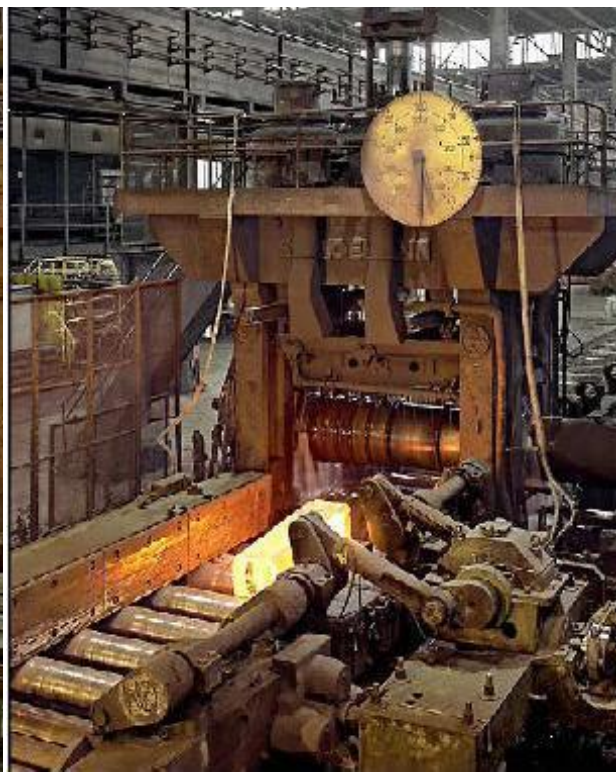


Obr. 29: Schéma pracovních válců se skříňovými kalibry I-III [16]

Postupné válcování na hladkých stolicích (obr. 30.) v jednotlivých kalibrech zajistí rovnoměrné prodloužení a při válcování v zářezích (obr. 31.) se docílí požadovaného tvaru a rozměrů.



Obr. 30: Válcování ve skříňových kalibrech [12]



Obr. 31: Válcování na blokovně [12]

3.7 Vliv různých parametrů na uzavření trhlin

A.Wang [17] experimentálně zjišťoval pomocí optické a elektronové mikroskopie míru zavaření předem vyvrtaných otvorů v bradě po válcování za tepla, protože svařování je nejdůležitějším faktorem mechanických vlastností válcovaných výrobků. Vady způsobené pórovitostí nebo smršťováním se nacházejí do určité míry ve všech oceli po ztuhnutí

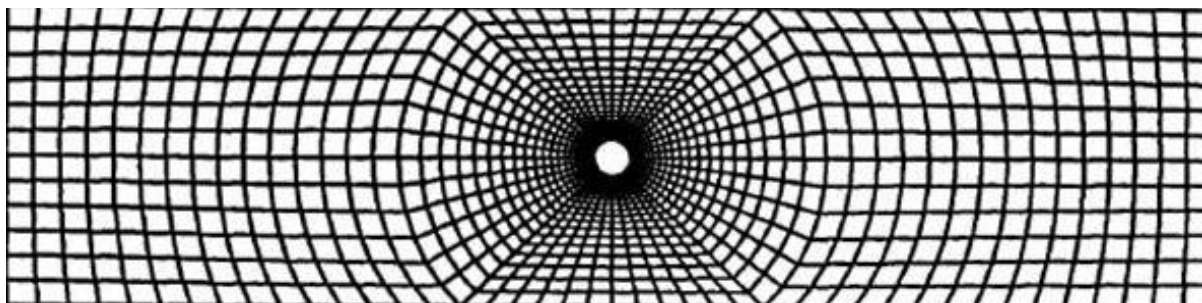
Pro zjištění chování trhlin byl proveden experiment s předvrtanými otvory. Tento pokus prokázal, že díry se začnou zavírat a svařovat postupně od okrajů ke středu.

Různě rozmístěné povrchové otvory válcované při vyšší teplotě (1200 °C), ukázaly, že otvory na povrchu se svařují velmi dobře, a pevnost svaru byla dostatečně vysoká, aby odpovídala, obecnému (neporušenému) kovu. Když válcovací teplota byla vyšší než 1050 °C, stopy děr byly čisté. Ale při nízké teplotě, jako je 900 °C, může být podél díry viděn černý oxid železitý. V tomto případě, i když byla na povrchu díra svařená, tento svar je velmi křehký.

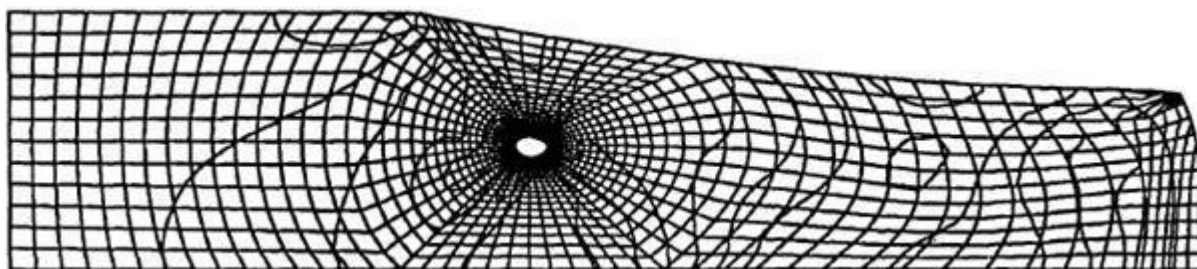
Pomocí softwaru Abaqus byla provedena analýza pomocí metody konečných prvků při válcování k vyšetřování účinku napětí a deformace na uzavření otvoru.

Obr. 34 ukazuje průběh uzavření dutiny během válcování simulací konečných prvků v podmínkách 30 % úběru a 1050 °C válcovací teploty. Názorná ukázka toho, že po vstupu do válcovací mezery se kruhová trhlina (**obr. 32.**) deformuje do oválného tvaru a uzavření pak začíná na konci dlouhé osy oválu (**obr. 33.**), a postupuje směrem ke středu.

Uzavření dutiny bylo vždy dokončeno před dosažením roviny výstupu. Podle různých válcovacích podmínek, byly dutiny uzavřeny stejným způsobem, jak je znázorněno na **obr. 34**, ale v okamžiku, kdy se otvory začaly zavírat a v období, nutném k dokončení uzavření trhliny byly ovlivněny parametry válcování a umístěním otvoru:



Obr. 32: Základní síť použitá k modelu desky s otvorem umístěným ve středu mezi povrchem a osou před válcováním



Obr. 33: Deformovaná deska a otvor znázorněný v přechodné fázi během válcování při 30 % deformaci a teplotě 1050 °C

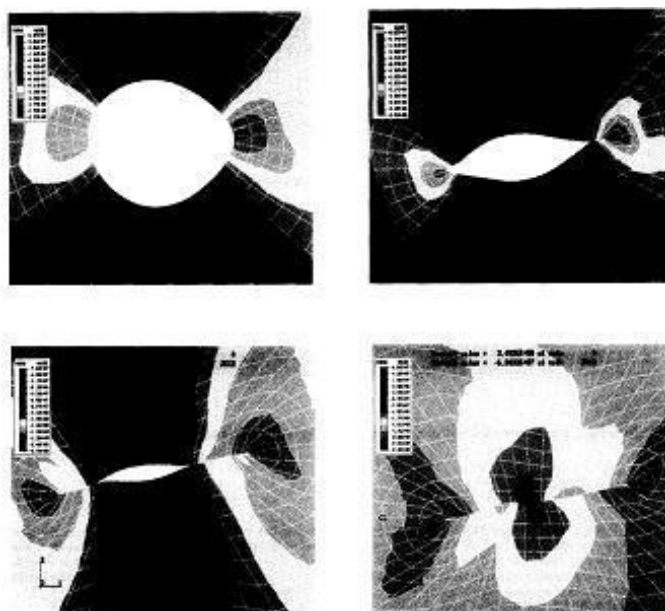
- Vliv redukce:

Všechny dutiny byly zavřené, když úběr byl stejný nebo vyšší než 30 %, a při vyšších úběrech se otvory zavřely dříve a rychleji ve válcovací mezeře.

Jestliže se dutiny uzavřou na začátku, jsou vystaveny tlaku po dlouhou dobu a to je důvodem lepšího zavaření.

- Vliv umístění: póru

Kdyby byl umístěný v pozici blíže k válcovanému povrchu, uzavře se dříve a rychleji, jak tomu bylo v experimentu.



Obr. 34: Proces uzavření pórů během válcovací simulace 30 % úběru a teplotě 1050 °C.

- Vliv smykového napětí a smykové deformace:

Vyšší hodnoty smykového napětí a smykové deformace odpovídají podmínkám pro lepší uzavření otvoru a svařování povrchu dutin, což naznačuje, že stříhání přispívá k uzavření povrchu. Zvýšení koeficientu tření vyvolává smykové napětí, což znamená, že rostoucí tření mezi válci a obrobkem může zlepšit eliminaci otvorů.

Výsledky experimentu ukázaly, že míra uzavření dutin byla ovlivněna parametry válcování a polohy otvorů vzhledem k válcovaným plochám.

Bylo zjištěno, že:

- Zvýšení teploty pomáhá k uzavření a svařování dutin.
- Otvory blíže povrchu válcování se uzavírají a svařují snadněji.
- Otvory se vždy začnou uzavírat a svářet od okrajů a postupně směrem ke středu.
- Ačkoli některé uzavřené otvory byly svařeny, pevnost rozhraní byla menší než jejich okolí s výjimkou případů, kdy válcování bylo provedeno na dostatečně vysoké teplotě.
- Stříhání není nezbytné pro uzavření otvoru, ale je to užitečné. Zvýšením koeficientu tření mezi válci a obrobkem se zlepší jejich uzavření.
- Po válcování při teplotě 900 °C byl podél díry pozorován černý oxid železitý a při nižší deformaci se vyskytoval ve větším množství, což naznačuje, že vyšší teplota a vyšší deformace jsou užitečné při snižování vlivu oxidů na svařování povrchu póru.

Chaaban a Alexander [17] studovali uzavírání vyvrtaných otvorů v sochoru pomocí rotačního kování. Bylo zjištěno, že rychlost zavírání podélných děr byla vyšší než zavírání příčných děr o stejném průměru. Pomocí optické mikroskopie se ukázalo, že i když se oba konce děr dotkly a uzavřela se mezera, povrch byl přerušovaný. Následující zkoušky ohybem ukázaly stopy děr, které způsobily selhání materiálu. K zalepení došlo pouze, když snížení plochy bylo větší než 60 %.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experiment se skládal ze dvou částí. První část byla zaměřena na počáteční mikrostrukturu před válcováním oceli 42CrMo4, která by měla ukázat možné iniciátory vzniku trhlin na hranicích zrn, nezhuštěnou strukturu po odlévání na sochorovém ZPO tzn. licí vady, především řediny. Dále by tento experiment měl potvrdit nebo vyvrátit, že trhliny nevznikají v litém stavu, ale až při válcování.

Druhá část praktické části se zaměřila na válcování v laboratorních podmínkách předem vyrobených vzorků z kruhových sochorů na kvarto válcovací stolici K350. Pro ohřev sochorů byla použita laboratorní pec s maximální teplotou 1340 °C. Dále na vhodné kalibraci, kterou by se mělo docílit stejných rozměrů při válcování menším počtem průchodů. Do vzorků byly vyvrtány díry, které simulovaly vnitřní vady, cílem bylo zjistit, jak se válcovacími pochody zacelily. Nakonec vyhodnotíme strukturu po válcování a porovnáme velikost nezavařených dutin podle původní a nové kalibrace.

4.1 Metalografický rozbor

4.1.1 Popis experimentu

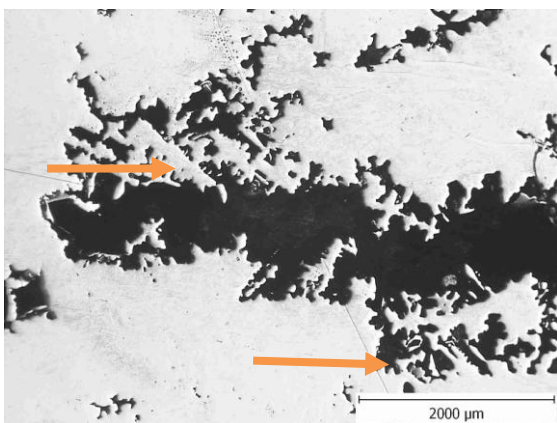
Celkem 6 vzorků oceli 42CrMo4 o přesném chemickém složení uvedeném v **tabulce 6**, připravených pro metalografický rozbor jsem nejdříve brousil od nejdrsnějších kotoučů po ty nejjemnější, aby se postupně vyhladil povrch. Pak následovalo leštění pro zahlázení rysek a nakonec jsem použil leptadlo o složení: H₂O, HCl, CuCl₂, líh pro zviditelnění struktury. Tento rozbor se prolíná s BP [18], ve které byly vzorky ze stejné oceli použity pro klínovou válcovací zkoušku.

Tabulka 6: Chemické složení

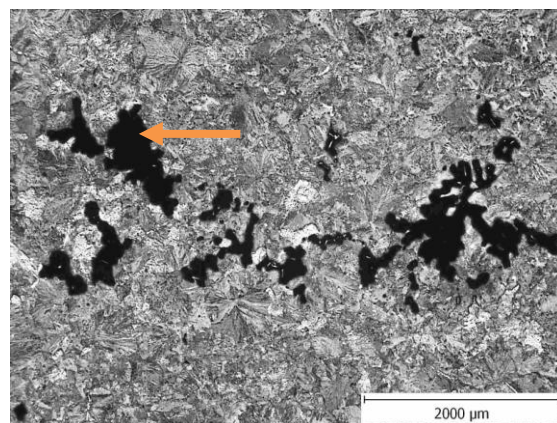
42CrMo4			
Chemická látka	Hmotnostní procenta	Chemická látka	Hmotnostní procenta
C	0,43	Mo	0,225
Mn	0,81	W	0,01
Si	0,26	V	0,007
P	0,012	Ti	0,001
S	0,015	Co	0,004
Cu	0,02	As	0,002
Cr	1,9	Sn	0,001
Ni	0,022	B	0,002
Al	0,032	Nb	0,002
Al SOL	0,032		

4.1.2 Výsledky rozboru

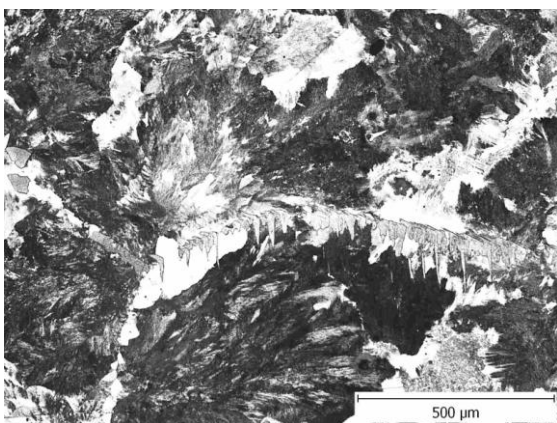
Výsledky laboratorního rozboru ukázaly předpokládaný výskyt vnitřních vad spojeným s tuhnutím kovových slitin při odlévání, jakými jsou řediny a staženiny, které vznikají následkem objemového smršťování tuhnoucí kapaliny. Pro jejich vznik je charakteristický podtlak a krystalický povrch s ostrými až zaoblenými hroty čistých nezoxidovaných dendritů, jak je patrné na sérii obrázků (**obr. 35 - 42.**). Je zde vidět také přítomnost pilového feritu, jehož konce představují iniciátory vzniku trhlin na hranicích zrn, které se následně mohou šířit



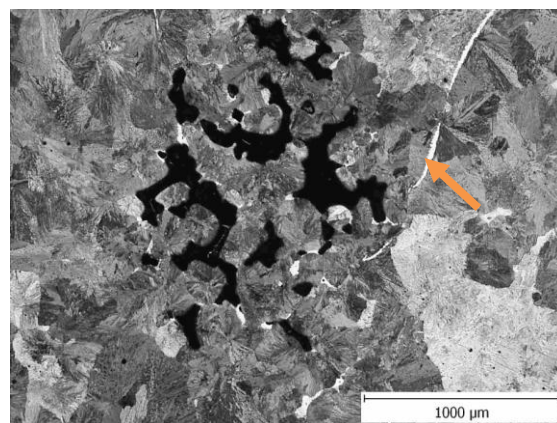
Obr. 35: Řediny a nezoxidované dendrity
šipky ukazují dendrity



Obr. 36: Šipka ukazuje řediny ve struktuře

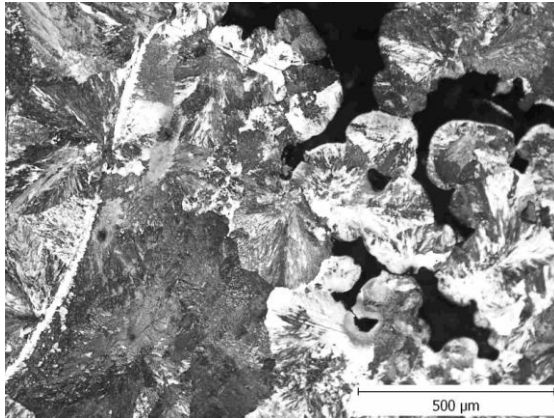
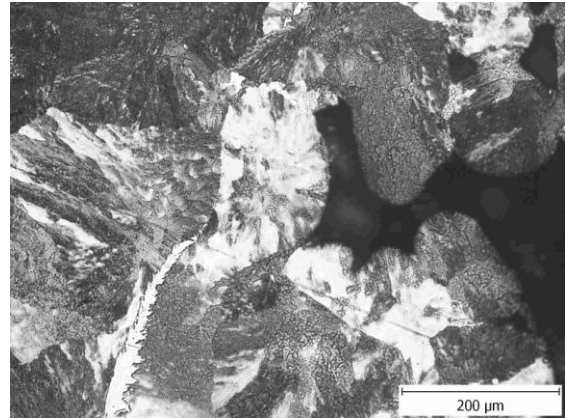
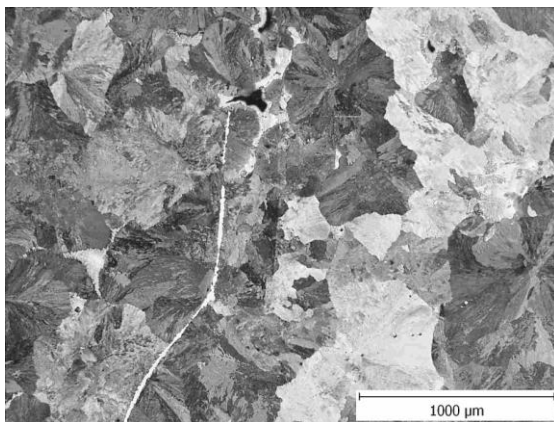
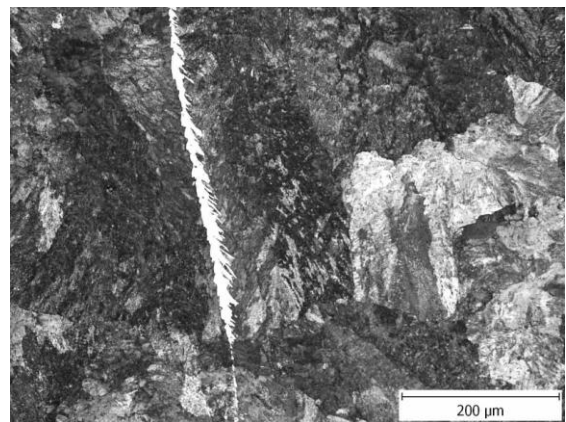


Obr. 37: Základná struktura bainitu



Obr. 38: Zde jsou přítomny řediny, perlit a ferit, šipka ukazuje ferit

Řediny se táhly téměř po celé délce zkoumaného materiálu. Díky velmi pomalé rychlosti ochlazování je struktura tvořena převážně perlitem a v omezené míře feritem, který se tvoří na hranici původního austenitického zrna.

**Obr. 39:** *Ferit a řediny***Obr. 40:** *Ferit na hranici zrna***Obr. 41:** *Mikrostruktura s táhlým feritem***Obr. 42:** *Detail pilového feritu*

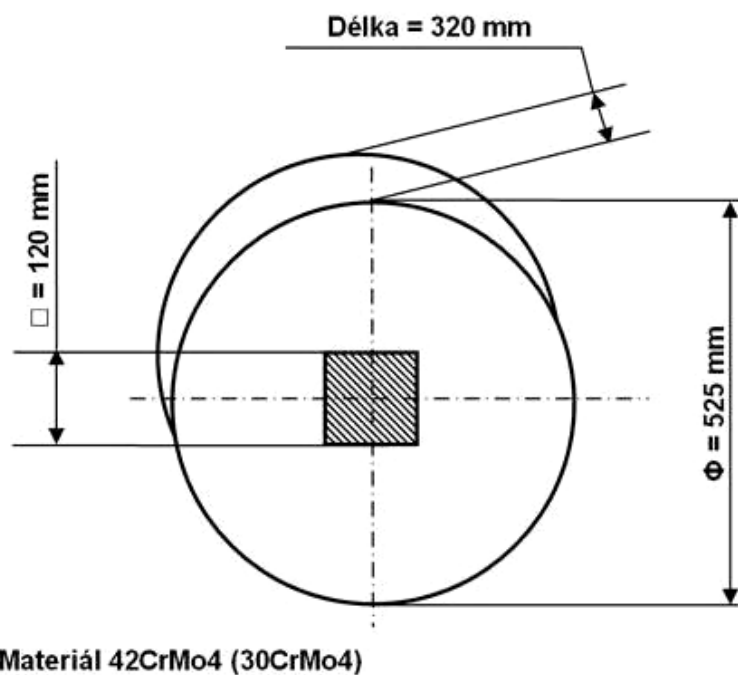
4.2 Diskuse výsledků

Na základě snímků původní mikrostruktury nelze vyloučit možnost, že ke vzniku trhlin dochází už při plynulém odlévání v oblasti zakřivení krystalizátoru, kde dochází k mírné deformaci PLP. Přítomnost feritu však může mít podstatný vliv na tvorbu mikrotrhlin, záleží však na jeho poloze vůči ose válcování, jemnosti struktury a velikosti vzniklých poměrných deformací.

4.3 Válcování kruhového sochoru

4.3.1 Popis experimentu

Z kruhového kontislitku $\varnothing 525$ mm a délky 320 mm (**obr. 43.**) byly vyrobeny celkem 4 vzorky (z toho 3 se podrobily experimentu), materiál byl odebrán ze středu kontislitku, kde při válcování vznikají vnitřní vady, které následně způsobují praskání polotovaru.



Obr. 43 Kruhový kontislitek, z jehož středu se vyrobily vzorky

Experimentální vzorky měly $\varnothing 42$ mm a délku 150 mm. V každém vzorku byly uměle vytvořeny dutiny o průměru 5 mm, ve středu vzorku a v $\frac{1}{4}$ průměru vzorku na příčných osách válcování, které měly simulovat vnitřní vady ve struktuře (viz., **obr. 44-45.**).



Obr. 44: Dutiny v příčných osách



Obr. 45: Středová dutina

4.3.2 Cíl experimentu

Cílem pokusu bylo zjistit velikost stažení dutiny (trhliny) a vliv technologických činitelů na hloubku proniku plastické deformace do středu sochory, to vše podle kalibrace z Třineckých Železáren. Při pokusu jsme měli k dispozici dvě kalibrace, ta původní se válcuje z průměru $\varnothing 525$ mm na blok o rozměrech 285x285 mm a nová na 260x260 mm.

4.3.3 Původní kalibrace

Při válcování podle původní kalibrace docházelo k častým problémům spojeným se vznikem trhlin, a proto byla vytvořena nová kalibrace.

Původní kalibraci jsem přepočítal pro laboratorní válce o průměru 70 mm v měřítku 12,5:1 (viz., tab. 7-8).

Hlavní rozdíly mezi kalibracemi. Nová kalibrace má:

- méně průchodů a hranění – větší efektivita výroby
- větší průměrnou i celkovou deformaci ε_h – deformace proniká do jádra provalku

Tabulka 7: Původní kalibrace

Úběr	kalibr	hr.	h_0	h_1	Δh	h_s	R_d	R_h	l_d	l_d/h_s	R min	ε_h
			mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	%
1	I		525	480	45	502,5	420	415	137,07	0,27	1 403	8,57
2	I		480	440	40	460	420	415	129,23	0,28	1 323	8,33
3	I		440	380	60	410	420	415	158,27	0,39	700	13,64
4	II	X	560	520	40	540	395	400	126,09	0,23	1 823	7,14
5	I	X	395	380	15	387,5	420	415	79,13	0,2	2 503	3,80
6	II	X	525	480	45	502,5	395	400	133,74	0,27	1 403	8,57
7	I	X	395	380	15	387,5	420	415	79,13	0,2	2 503	3,80
8	II	X	485	440	45	462,5	395	400	133,74	0,29	1 188	9,28
9	I	X	395	380	15	387,5	420	415	79,13	0,2	2 503	3,80
10	II	X	445	380	65	412,5	395	400	160,74	0,39	654	14,61
11	II	X	395	350	45	372,5	395	400	133,74	0,36	771	11,39
12	II		350	310	40	330	395	400	126,09	0,38	681	11,43
13	II		310	270	40	290	395	400	126,09	0,43	526	12,90
14	III	X	395	330	65	362,5	420	415	164,73	0,45	505	16,46
15	I		330	280	50	305	420	415	144,48	0,47	465	15,15
16	I	X	295	283	12	289	420	415	70,78	0,24	1 740	4,07
17	I	X	288	285	3	286,5	420	415	35,39	0,12	6 840	1,04

Tabulka 8: *Přepočtená kalibrace pro laboratorní válc*

Úběř	kalibr	hr.	h_0	h_1	Δh	h_s	R_d	R_h	l_d	l_d/h_s	R_{min}	ϵ_h
			mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	%
1	I		42	38,4	3,6	40,2	33,5	33,5	10,83	0,27	112	8,57
2	I		38,4	35,2	3,2	36,8	33,5	33,5	10,23	0,28	106	8,33
3	I		35,2	30,4	4,8	32,8	33,5	33,5	12,45	0,39	56	13,64
4	II	X	44,8	41,6	3,2	43,2	33,5	33,5	10,23	0,23	146	7,14
5	I	X	31,6	30,4	1,2	31	33,5	33,5	6,31	0,2	200	3,80
6	II	X	42	38,4	3,6	40,2	33,5	33,5	10,83	0,27	112	8,57
7	I	X	31,6	30,4	1,2	31	33,5	33,5	6,31	0,2	200	3,80
8	II	X	38,8	35,2	3,6	37	33,5	33,5	10,83	0,29	95	9,28
9	I	X	31,6	30,4	1,2	31	33,5	33,5	6,31	0,2	200	3,80
10	II	X	35,6	30,4	5,2	33	33,5	33,5	12,94	0,39	52	14,61
11	II	X	31,6	28	3,6	29,8	33,5	33,5	10,83	0,36	62	11,39
12	II		28	24,8	3,2	26,4	33,5	33,5	10,23	0,38	54	11,43
13	II		24,8	21,6	3,2	23,2	33,5	33,5	10,23	0,43	42	12,90
14	III	X	31,6	26,4	5,2	29	33,5	33,5	12,94	0,45	40	16,46
15	I		26,4	22,4	4	24,4	33,5	33,5	11,40	0,47	37	15,15
16	I	X	23,6	22,64	0,96	23,12	33,5	33,5	5,65	0,24	139	4,07
17	I	X	23,04	22,8	0,24	22,92	33,5	33,5	2,83	0,12	547	1,04

kde R_d a R_h jsou poloměry dolního a horního pracovního válce

R_{min} je minimální poloměr válců, aby deformace pronikla do středu provalku (rov. č.6)

l_d/h_s je pronik plastické deformace

První vzorek byl vsazen do pece o teplotě 1300 °C a ohříval se po dobu 20 minut, aby došlo k rovnoměrnému ohřevu mezi povrchem a středem sochory a nevznikala tím nerovnoměrná deformace v teplejších místech. Následně byl podélně válcován na kvarto stolici K350 a hraněn v příslušných úběrech. Po každém úběru byl opět vložen do pece a dohřát na teplotu 1250-1260 °C. Podmínky válcování byly nastaveny optimálně tzn. rovnoměrný ohřev na tvářecí teplotu, neprovádělo se odokujení a rychlost válcování, byla 15ot/min., což podporuje rekrytalizaci. Už při třetím průchodu, kde je vysoká poměrná deformace jsme museli zvětšit úběř na 30,62 z původních 30,4 mm, protože provalek nešlo proválcovat. Při čtvrtém průchodu se materiál začal zkrucovat na jednu stranu, při následném hranění se téměř vyrovnal. Na výrazný projev deformace při válcování pouze na hladkém válcí jsme narazily v závěru kalibrace, kdy nejprve v 13. průchodu musel být zvětšen úběř, protože provalek 2x neprošel z 21,6 na 22 mm současně i vyšší teplotě, aby byl menší deformační odpor. Nakonec se musel protlačit. Pak při 14. průchodu došlo k vytvoření

výrazné vrtule na začátku provačku, příčinou bude největší poměrná deformace a při 15. posledním úběru se opět musel zvětšit úběr na 22,6 z 22,4 mm.

Poslední dva úběry nebyly prováděny, protože vlivem vrtulovitého tvaru provačku (**obr. 46.**) by se již nedalo zahrnit a navíc poměrná deformace je příliš malá a neprošla by do středu bloku. Slouží hlavně pro docílení konečného tvaru pomocí kalibrů.



Obr. 46: Tvar vrtule vzniklý po posledním válcování

4.3.4 Výsledky válcování podle původní kalibrace

Na finálním vývalku, který po doválcování chladl volně na vzduchu, byla zkoumána jeho struktura, velikost vytvořených dutin a rozměry provačku po průřezu.

Rozměry byly měřeny pomocí elektronického posuvného měřidla každé 3 cm včetně začátku, konce a velikosti úhlopříček a jsou uvedeny v **tabulce 9**, měření komplikoval nerovnoměrný povrch a přítomnost okují.

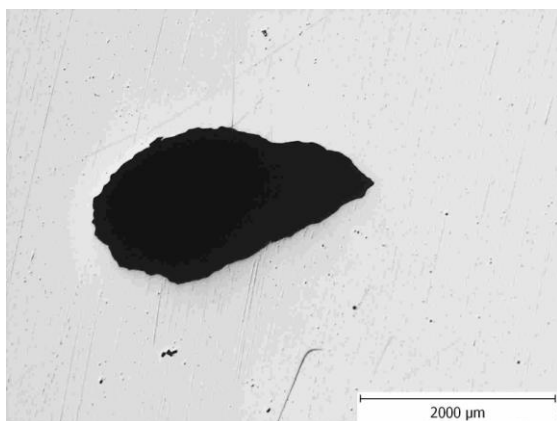
Tabulka 9: Rozměry po válcování prvního sochoru

Vzorek č.1					
Měření	Horní strana	Pravý bok	Levý bok	Dolní strana	Úhlopříčky
	mm	mm	mm	mm	mm
1	23,14	22,50	22,50	21,45	na začátku
2	23,80	22,97	22,40	22,95	
3	23,72	22,49	22,52	23,32	
4	23,78	22,38	22,54	23,38	
5	23,05	22,34	22,51	23,47	
6	23,38	22,36	22,44	23,20	na konci
7	23,40	22,66	22,43	23,20	
8	23,97	22,37	22,73	23,45	
9	23,65	22,51	22,83	23,39	
10	23,75	22,33	23,34	23,51	
11	24,15	22,63	23,46	23,60	
12	24,14	23,60	23,96	24,14	

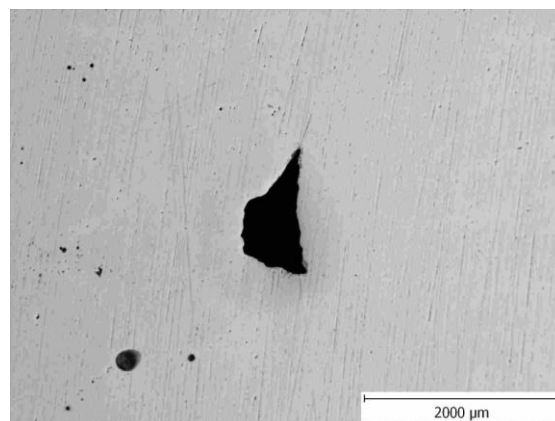
4.3.4.1 Struktura

Pro zjištění struktury a (hloubky) proniku plastické deformace byl provalek rozřezán na 7 částí (vzorků). U vzorku číslo 2 (**obr. 47-48.**) byly nafoceny průměry trhlin, které se u původní kalibrace nezacelily. Vzorek číslo 5 byl rozřezán podélně a poté ještě příčně v místě trhliny. Jeho struktura byla podrobena analýze (**obr. 49-53.**). Jednotlivé makrostruktury a mikrostruktury jsou patrné z následujících obrázků.

Makrostruktura

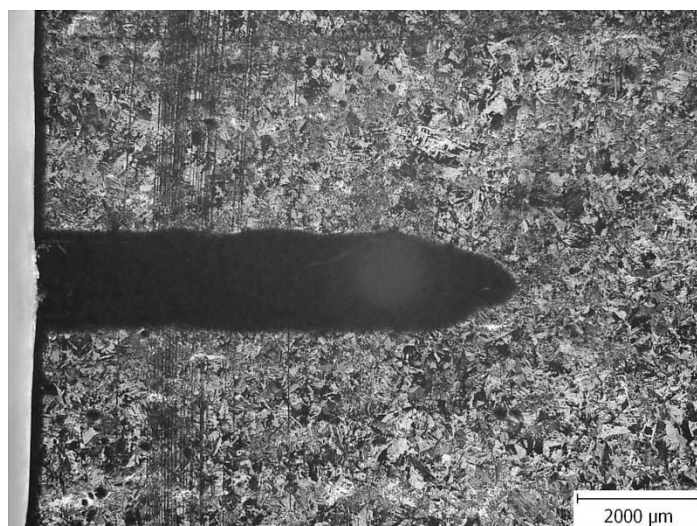


Obr. 47: Velikost středové trhliny u vz. č.2

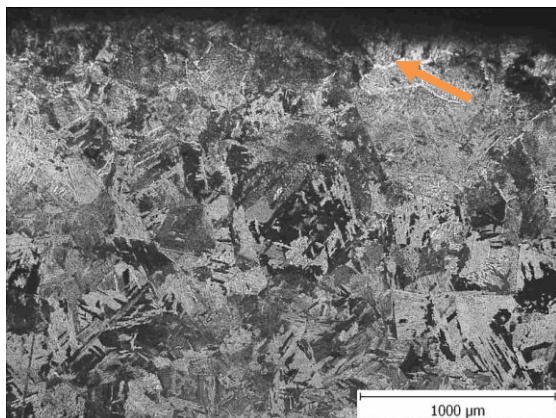


Obr. 48: Velikost horní trhliny u vzorku č.2

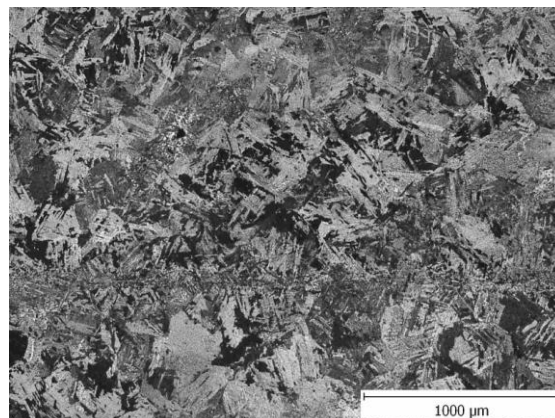
Mikrostruktura



Obr. 49: Vz.č.5; struktura kolem čela dutiny

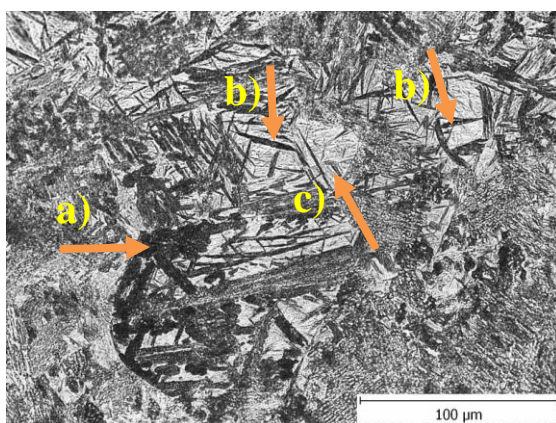


Obr. 50: Síťový feritu - povrch

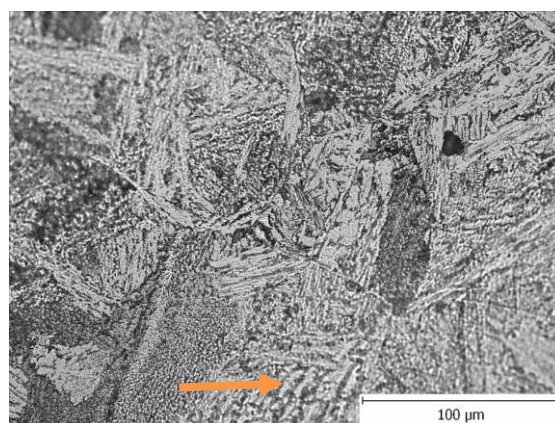


Obr. 51: Bainit a martenzit - střed

Výsledná mikrostruktura je martenzitická a lokálně bainiticko-martenzitická. Pod povrchem (**obr.50.**) je vidět síťový podeutektoidního feritu v důsledku částečného oduhličení povrchových vrstev materiálu při ohřevu na tvářecí teplotu.



Obr. 52: Oblast martenzitu, jednotlivé šipky ukazují a)čočkový a b)deskový martenzit c)zbytkový austenit



Obr. 53: Bainitická struktura, šipka ukazuje bainit

Na (**obr. 52.**) se vyskytuje oblast segregace s výskytem útvaru deskového martenzitu, lankového martenzitu a zbytkového austenitu, kterého zde je vysoký podíl (přítomnost deskového martenzitu svědčí o segregaci). Zbytkový austenit je mezi deskami martenzitu. Předpokládá se, že zde je zvýšený podíl uhlíku kolem 0,6 %, neboť právě on je důsledkem vzniku deskového martenzitu.

Na (**obr. 53.**) je základní bainitická struktura místy až lokálně bainitická. Na žádném snímku zde nebyla vidět lici struktura.

4.3.5 Nová kalibrace

Byla zhotovena, aby zabránila porušení středové soudržnosti sochoru. Nová kalibrace (**tab. 10**) by měla přinést větší efektivitu práce a lepší válcovací podmínky. Měly by se lépe zaválcovat případné mikrotrhliny vzniklé při odlévání nebo při válcování. Kalibraci jsem opět přepočítal pro laboratorní válce Ø 70 mm (**tab. 11**). Rozdíly mezi oběma kalibracemi je uveden v **tabulce 12**.

Tabulka 10: *Nový průchodový plán*

Úběr	kalibr	hr.	h_0	h_1	Δh	h_s	R_d	R_h	l_d	l_d/h_s	R min	ϵ_h
			mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	%
1	I		525	460	65	493	420	420	162	0,33	933	12,38
2	I		460	420	40	440	420	420	128,06	0,29	1210	8,70
3	I		420	380	40	400	420	420	128,06	0,32	1000	9,52
4	II	X	540	480	60	510	420	420	155,88	0,31	1084	11,11
5	I	X	395	380	15	388	420	420	79,02	0,20	2503	3,80
6	II	X	485	440	45	463	420	420	135,62	0,29	1188	9,28
7	II		440	380	60	410	420	420	155,88	0,38	700	13,64
8	II	X	380	320	60	350	420	420	155,88	0,45	510	15,79
9	II		320	270	50	295	420	420	142,74	0,48	435	15,63
10	III	X	380	320	60	350	420	420	155,88	0,45	510	15,79
11	III		320	260	60	290	420	420	155,88	0,54	350	18,75
12	III	X	275	255	20	265	420	420	91,10	0,34	878	7,27
13	III	X	280	265	15	273	420	420	79,02	0,29	1238	5,36

Tabulka 11: *Nový průchodový plán přepočtený pro laboratorní válce*

Úběr	kalibr	hr.	h_0	h_1	Δh	h_s	R_d	R_h	l_d	l_d/h_s	R min	ϵ_h
			mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	%
1	I		42	36,8	5,2	39,4	33,5	33,5	12,94	0,33	74,63	12,38
2	I		36,8	33,6	3,2	35,2	33,5	33,5	10,23	0,29	96,80	8,70
3	I		33,6	30,4	3,2	32	33,5	33,5	10,23	0,32	80	9,52
4	II	X	43,2	38,4	4,8	40,8	33,5	33,5	12,45	0,31	86,70	11,11
5	I	X	31,6	30,4	1,2	31	33,5	33,5	6,31	0,20	200,21	3,80
6	II	X	38,8	35,2	3,6	37	33,5	33,5	10,83	0,29	95,07	9,28
7	II		35,2	30,4	4,8	32,8	33,5	33,5	12,45	0,38	56,03	13,64
8	II	X	30,4	25,6	4,8	28	33,5	33,5	12,45	0,44	40,83	15,79
9	II		25,6	21,6	4	23,6	33,5	33,5	11,40	0,48	34,81	15,63
10	III	X	30,4	25,6	4,8	28	33,5	33,5	12,45	0,44	40,83	15,79
11	III		25,6	20,8	4,8	23,2	33,5	33,5	12,45	0,54	28,03	18,75
12	III	X	22	20,4	1,6	21,2	33,5	33,5	7,28	0,34	70,22	7,27
13	III	X	22,4	21,2	1,2	21,8	33,5	33,5	6,31	0,29	99,01	5,36

Tabulka 12: *Hlavní rozdíly původní a nové kalibrace*

Kalibrace	Počet průchodů	Hranění	Max. deformace	Průměrná def.
Původní	17	11	16,46%	9,06%
Nová	13	7	18,75%	11,31%

Postup při válcování byl stejný, jako u válcování prvního sochoru. Vzorky byly válcované z teploty 1250-1300 °C. U vzorku č.2, docházelo k častějším problémům při záběru válců, hlavně v posledních průchodech, kde je poměrná deformace vyšší než 10 %.

Postupně se od 5. průchodu vlivem kalibrace začal tvořit obdélníkový profil, který je náchylnější ke zkosení. V 9. průchodu došlo k mírnému zkosení a prohnutí provačku, což při dalším úběru vedlo k celkovému prohnutí provačku patrnou na (**obr. 54.**).

U vzorku č.3 na (**obr. 55.**) bylo válcování nejúspěšnější. Podařilo se ho tvářet v ose válcování, takže nedocházelo k takové nepříznivé deformaci jako u předešlého vzorku. U 10. průchodu jsme museli zvýšit úběr z 25,6 na 26,1 mm. Poslední proválcování bylo v 11. průchodu, kde proběhla největší deformace, téměř 19 % s největším pronikem do středu provačku, což by se mělo projevit při vyhodnocování výsledků.



Obr. 54: *Vzorek č.2, provaček se vlivem vysoké deformace zkroutil a nebylo ho možné doválcovat na plánovaný rozměr*



Obr. 55: *Vzorek č.3, snímek zachycující odpad okují*

4.3.5.1 Výsledky nové kalibrace

Tvar provalku vzorku č.2 má prokazatelně obdélníkový průřez a zkroucený profil, který je způsoben válcováním mimo osu válcování. Vzorek č.2, který se nepovedlo doválcovat všemi průchody, má následující rozměry (**viz., tab. 13**):

Tabulka 13: Rozměry po válcování druhého sochoru

Vzorek č.2					
Měření	Horní strana	Pravý bok	Levý bok	Dolní strana	Úhlopříčky
	mm	mm	mm	mm	mm
1	23,34	21,14	24,47	24,19	na začátku
2	25,42	23,11	23,25	25,75	
3	25,52	22,25	22,89	25,89	
4	26,17	23,65	23,84	26,19	
5	25,40	23,58	22,76	25,14	
6	26,66	24,10	24,09	26,20	na konci
7	26,12	24,71	24,12	25,80	
8	25,54	24,90	24,86	24,53	
9	29,84	24,75	22,94	28,73	
10	32,70	21,05	21,24	32,21	
11	32,86	21,09	21,62	31,24	37,94 a 35,20

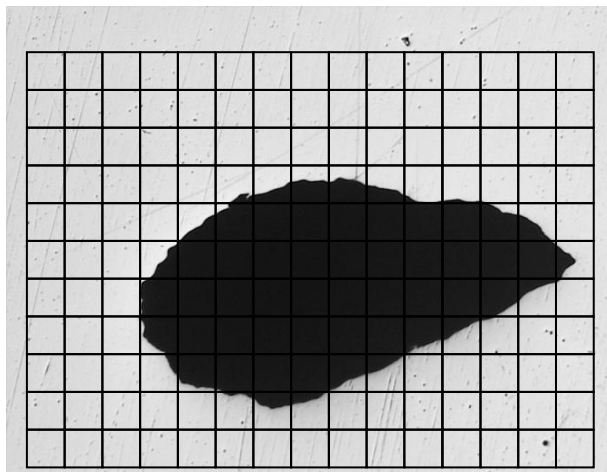
Vzorek č.3, který se povedlo doválcovat 11 průchody, válcování v posledních dvou průchodech jsme vynechali, protože provalek byl již mírně zkroucený, takže by neprošel přesně osou válcování a mohl by se více zdeformovat, než aby dosáhl tvaru čtverce. Navíc při posledních průchodem je poměrná deformace velmi nízká a neproniká do středu provalku, tím by nedošlo k úplnému zavaření trhlin. Provalek má rozměry uvedené v **tabulce 14**:

Tabulka 14: Rozměry po válcování třetího sochoru

Vzorek č.3					
Měření	Horní strana	Pravý bok	Levý bok	Dolní strana	Úhlopříčky
	mm	mm	mm	mm	mm
1	25,70	23,15	23,51	25,86	na začátku
2	24,96	22,38	21,86	24,62	
3	24,10	21,59	21,93	24,46	
4	24,80	21,07	21,20	25,02	
5	24,12	21,38	21,47	24,32	
6	24,42	21,25	21,33	24,89	na konci
7	23,83	21,13	20,67	24,41	
8	24,26	20,94	20,48	24,19	
9	24,36	21,28	20,54	24,81	
10	24,64	21,05	20,87	25,14	
11	25,10	21,84	21,23	24,75	26,40 a 35,20
12	24,50	21,48	21,32	24,30	
13	24,01	21,27	21,90	24,24	

4.4 Výsledky

Pro porovnání zavaření trhlín mezi všemi vzorky posloužily fotografie zvětšené optickým mikroskopem. Pro určení velikosti povrchu dutiny sloužila teda zvětšená fotografie s pomocí metody čtverců. Tato metoda spočívá v rozložení čtvercové sítě po celé ploše trhlíny (obr. 56.). Pak se spočítají zcela zaplněné čtvercové plochy (má hodnotu 1) a k nim se přičtou i plochy protínající větší polovinu čtverce (mají hodnotu 0,5). Ty, které nezaujmají více než polovinu plochy čtverce, se nezapočítají.



Obr. 56 Toto je vzorek č. 1 proložený čtvercovou sítí

Experimentálním válcováním se ukázalo, že původní kalibrací nelze dutiny v kontislitku uzavřít. Při použití nové kalibrace došlo k uzavření všech dutin.

U prvního vzorku válcovaného podle původní kalibrace byl povrch středové trhliny největší, dosahoval skoro 3 mm^2 . Trhlina pod povrchem *(podélná osa) se zcela zatáhla, zatímco boční (příčná osa) trhlina dosahovala $0,5 \text{ mm}^2$, takže se dá shrnout, že se trhliny lépe zacelily pod povrchem materiálu. Je to způsobené větším počtem hranění v příslušné ose válcování. V tzv. boční dutině jich proběhlo méně a navíc byla méně intenzivní průměrná poměrná deformace, proto se dutiny v těchto místech nezacelily. Tak velká středová dutina znamená, že deformace intenzivně nepronikala do středu vzorku.

U vzorku č.2, kde se použila nová kalibrace došlo téměř k zavaření středové trhliny, jejíž největší plocha dosahovala už jenom kolem 1 mm^2 , ale zato trhlina na boku se stáhla jenom na $2,2 \text{ mm}^2$. Podél průřezu vývalku se dutiny dobře zavařovaly, to se však nedá říct o obou koncích vývalku, kde středová dutina měla plochu $1-1,5 \text{ mm}^2$ a boční dutina $2-2,5 \text{ mm}^2$.

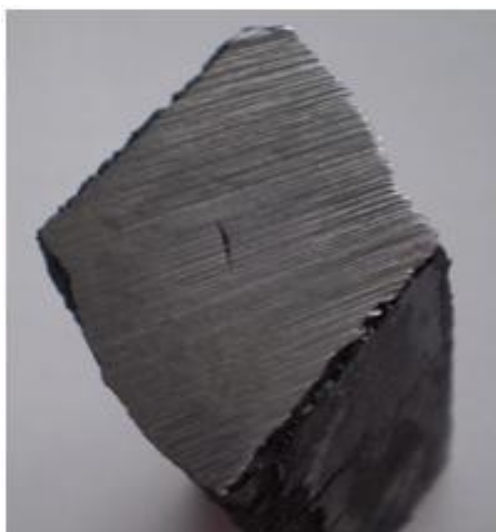
Pro třetí vzorek se výpočet plochy neprováděl, protože prošel všemi průchody a po rozřezání vzorku nebyly trhliny viditelné, až na jednu, jejíž plocha se orientačně určila odhadem.

Pozn:* je zde vztaženo na polohu trhliny před 1. průchodem

Tabulka 15: Srovnání zavaření trhlín shrnuje následující tabulka

Vzorek č.1		Vzorek č.2		Vzorek č.3	
Velikost dutin		Velikost dutin		Velikost dutin	
středová[mm ²]	boční[mm ²]	středová[mm ²]	boční[mm ²]	středová[mm ²]	boční[mm ²]
2,91	0,5	0,91	2,2	1,25	-
		1,16	-	-	-

Podle nové kalibrace bylo válcování efektivnější a rychlejší, a pokud provalek prošel všemi průchody, došlo v ní k intenzivnější deformaci. Dutiny se jejím vlivem stáhly na okem nepozorovatelné rozměry. Jediná výrazná dutina byla uprostřed provalku, její oválový tvar o délce 4 mm byl protáhlý, což naznačuje, že se postupně zavařuje (**obr. 57a,b**).



a)



b)

Obr. 57: a) Vzorek č.3, trhlina má oválný tvar b) Detail trhliny

Výsledný tvar byl lepší u první kalibrace, kde se dosáhlo čtvercového profilu, zato u nové kalibrace výsledný tvar připomínal kosočtverec.

Cílem experimentu však nebylo dosažení čtvercového průřezu, ale zlepšení vnitřní struktury. Z tohoto hlediska byla nová kalibrace úspěšnější. Grafické porovnání všech tří vzorků je na (**obr. 58.**).



Obr. 58: *Porovnání velikosti dutin u vzorků zleva 1,2,3; zleva je vz. č.1 z původní kalibrace, vz č.2 a č.3 z nové kalibrace*

5 ZÁVĚR

Tato práce je zaměřena na stanovení proniku plastické deformace do středu tvářeného polotovaru s cílem zavařit uměle vytvořené dutiny, které představují trhliny vznikající při tuhnutí kovových slitin v Třineckých Železárnách. Následným tvářecím procesem – válcováním vznikají ve středu bloku trhliny a materiál praská. Naším úkolem je zjistit, jestli chyba spočívá v přípravě oceli nebo v jejím tváření. Jedná se o kruhový kontislitek Ø 525 mm, který se válcuje na blok 280x280 resp. 265x265 mm. Analýzu zavařování trhlín jsme zkoumali v laboratoři se zmenšenými vzorky 12,5:1 s původní lící strukturou. Dále jsme měli porovnat původní a novou kalibraci a tvařitelnost oceli 42CrMo4.

Experimentálně jsme zjistili vlivy obou kalibrací. Původní vykazovala malý pronik plastické deformace, neboť se předvrtané trhliny nezavařily. Důvodem byla nízká průměrná deformace, která byla jen něco málo přes 9 %, která nepronikla do jádrových oblastí.

Nová kalibrace pravděpodobně vyřešila dané problémy, neboť trhliny se v ní zcela zacelily, zvýšila se i průměrná deformace, která byla přes 11 % a pronikla do středu provačku. Ocel v litém stavu vykazovala zhoršenou tvařitelnost.

Experimentálně jsme zjistili, že při válcování lité struktury nevznikají žádné nové trhliny a ty, jenž byly uměle vytvořené se nerozšiřovaly, ale naopak měly tendenci se uzavírat. Z výsledků metalografického rozboru je patrné, že struktura obsahuje lící vady (řediny), které při tváření mohou způsobit porušení soudržnosti materiálu, ale nedochází k tomu.

Jako vhodné řešení se tedy zdá být nová kalibrace spolu s lepším zpracováním oceli (rafinací) při ocelářském pochodu a správně vedený ohřev.

Seznam použité literatury

- [1] [Http://ottp.fme.vutbr.cz](http://ottp.fme.vutbr.cz) [online]. 2000 [cit. 2010-08-26]. Plynulé odlévání oceli – základní principy . Dostupné z WWW: <<http://ottp.fme.vutbr.cz/vyzkum/kontiliti01.php>>.
- [2] GINZBURG, V. B. Steel-rolling technology : theory and practice. New York : Marcel Dekker, 1989. ISBN 0-8247-8124-4.
- [3] *Casting* [online]. 2007 [cit. 2010-08-23]. Casting microstructure and defects. Dostupné z WWW: <<http://openlearn.open.ac.uk/mod/resource/view.php?id=198356>>.
- [4] ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B. *Tváření oceli*. 1.vyd. Praha: SNTL, Bratislava: ALFA, 1988. 520 s.
- [5] ELBEL, T., et al. *Vady odlitku ze slitin železa*. Brno : MATECS, 1992.
- [6] *An Introduction to Failure Analysis for Metallurgical Engineers* [online]. 1999 [cit. 2010-08-22]. Wwww.google.com. Dostupné z WWW: <<http://www.tms.org/Students/Winners/Davidson/Davidson.html>>.
- [7] MAPELLI, C.; VEDANI, M.; ZAMBON, A. *On microstructure development and inclusion generation in a continuously cast resulphurised steel* [online]. 2002 [cit. 2010-08-22]. Wwww.google.com. Dostupné z WWW: <http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0327-07932002000300002>.
- [8] PANDEY, J. C.; RAJ, M.; CHOUBEY, P. N. . Split Ends and Cracking Problem During Hot Rolling of Continuously Cast Steel Billets. *J Fail. Anal. and Preven.*. 2009, 9:88–96
- [9] ELFMARK, J., a kol. *Tváření kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1992. 528 s.
- [10] HAIQI, Y, et al. Influence of electromagnetic brake on flow field of liquid steel in the slab continuous casting mold. *Journal of materials processing technology*(2008) 2008, 202.
- [11] www.trz.cz [online]. 2005-2010 [cit. 2010-04-22]. Dostupné z WWW: <www.trz.cz>.
- [12] SCHINDLER, I. Technologie válcování. VŠB-TU Ostrava : Ostrava, 2010
- [13] KOLLEROVÁ, M., et al. *Valcovanie*. Bratislava : Vyd. Alfa, Bratislava, 1991. 576 s.
- [14] ŽÍDEK, M., KUŘE, F. *Válcování*. 1.vyd. Ostrava: VŠB – TUO, 1983. 379 s.
- [15] FABÍK, R. *Tváření kovů*. VŠB-TU Ostrava : 2009
- [16] KWARTENG-ACHEAMPONG, O., *Posouzení uplatnění nových technologických postupů válcování blokových předlitků do bloků s cílem zhutnění jeho středové zóny*. Ostrava, 2005. 44 s. Bakalářská práce, VŠB-TU Ostrava.

- [17] WANG, A.; THOMSON, P.F.; HODGSON, P.D. A study of pore closure and welding in hot rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 60.
- [18] SUŠOVSKÝ, M., *Studium tvařitelnosti oceli 42CrMo4 v závislosti na parametrech ohřevu*. Ostrava, 2010. 43 s. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava.